



# Contribution à l'évaluation de la reconfigurabilité et réorganisabilité d'un micro système de production : application à une micro-usine d'assemblage.

Eric Descourvières

## ► To cite this version:

Eric Descourvières. Contribution à l'évaluation de la reconfigurabilité et réorganisabilité d'un micro système de production : application à une micro-usine d'assemblage.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2010. Français. NNT : . tel-00560171

**HAL Id: tel-00560171**

**<https://theses.hal.science/tel-00560171>**

Submitted on 27 Jan 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année : **2010**

# THESE

présentée à

**L'UFR des Sciences et Techniques  
de l'Université de Franche-Comté**

pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE  
DE FRANCHE-COMTE**

**en Automatique**

*(Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)*

**Contribution à l'évaluation de la reconfigurabilité et  
réorganisabilité d'un micro système de production :**  
*application à une micro-usine d'assemblage*

par

**Éric DESCOURVIÈRES**

Soutenue le 7 octobre 2010 devant la Commission d'examen :

Rapporteurs :

M. **Jean-Pierre BOUREY**, Professeur des Universités, LM<sup>2</sup>O, École Centrale Lille

M. **Lionel ROUCOULES**, Professeur des Universités, LSIS, ENSAM Aix-en-Provence

Examineurs :

M. **Patrick MARTIN**, Professeur des Universités, LCFC, ENSAM Metz (Président de jury)

M. **Laurent PHILIPPE**, Professeur des Universités, LIFC, UFC UFR-st

Directeurs de thèse :

M. **Philippe LUTZ**, Professeur des Universités, femto-st AS2M, UFC UFR-st

M. **Dominique GENDREAU**, Maître de Conférences, femto-st AS2M, UFC UFR-st



*Souvent, plusieurs inventions sont concomitantes,  
et surgissent « naturellement », ici ou ailleurs, à partir du moment  
où le milieu devient propice à leur apparition  
et où un homme,  
peut-être plus astucieux que les autres ou plus ouvert à l'innovation,  
a l' « étincelle créatrice ».*

[Bruno Jacomy, « Une histoire des techniques »]

Dédicace

à ma vahine, Karine

...māuruuru





## Remerciements

Au terme de ces travaux, je tiens à adresser solennellement mes sincères remerciements aux Pr. feu Alain Bourjault -Directeur du LAB-, Nicolas Chaillet - Directeur du département AS2M-, Michel De Labachellerie -Directeur de femto-st-, et mon Directeur de thèse Philippe Lutz -responsable de l'équipe SAMMI-, pour m'avoir accordé leur confiance tout au long de cette période de travaux de recherche.

Je remercie Mme Marie-Christine Creton, Directrice de l'INSA de Strasbourg, et le Pr. Roland De Guio, Directeur de la Recherche à l'INSA de Strasbourg, pour m'avoir accordé un minimum de décharge de service.

J'exprime en particulier ma reconnaissance à M. Dominique Gendreau, Maître de Conférences, co-Directeur de mes travaux de doctorat, avec lequel j'ai particulièrement collaboré, et à M. Abderrazzak Kadmiri, Directeur de l'UFR-ST, pour m'avoir accueilli récemment au sein de l'UFR-st.

J'ai une pensée particulière envers M. François Kiefer, Maître de Conférences, qui m'a accompagné dans l'initiation du système d'information de la micro-usine.

Je remercie les Professeurs, membres de mon jury : M. Jean-Pierre Bourey, M. Lionel Roucoules, M. Laurent Philippe, pour leur lecture attentive et critique et pour la pertinence de leurs remarques, ainsi que M. le Pr. Patrick Martin qui présida ce jury.

Les journées auraient été trop sombres dans notre bureau sans fenêtre sur l'extérieur s'il n'y avait pas eu mes nombreux acolytes, je pense à Dr MdCf Micky - Mister classe G-, David H, Mickaël G., Charly 'n his bees ! Mes camarades de bureau : Blaise, Lumi, Hafida, Alex... et de nombreux autres brillants collègues : Yassine, Christophe, Maryvonne, Eric B, Laeti, Ona, Anne, Kanty, Cécé, Brahim, Kaaarrim, Qiao, Arnaud, Jean-Yves, Cyrille, Slava, Toufou, Joël Quaternions et Joël le bâtisseur !

L'équipe du drone miniature Cigogne, la DGA, l'ONERA et la SEP pour un rêve devenu réalité ! (Renaud, re-François, Marc et toutes les petites mains du projet)

Olivier, Rémi, Adri, Did & souris, Isa et ses trois drôles de scouts, Pierre & Anne-Marie pour m'avoir sorti le nez du guidon, merci.

Christophe, Mariane, Maryline -la bande Grand'Ech'- pour leurs encouragements.

Sam et la bande des doux rêveurs de l'ADM, la team Korsika, Joha, Gillou, Stefun, tous ces aventuriers, canoteurs qui vivent leurs rêves, pour leurs valeurs humaines.

Pour leurs soutiens et leurs dopants non prohibés, j'adresse mes vifs remerciements à mes médecins et psychologues ! Naturellement, j'ai aussi créé du PIB avec la SNCF et la SAPRR qui auront su tirer profit de mes innombrables voyages.

Enfin et profondément, je remercie ma famille au sens large (parents et beaux-parents, sœurs, belle-sœur et beaux-frères, neveux et nièces, ma Ka... les nombreux cousins, sans oublier nos voisins les comtois et bovins, la fougueuse Cannelle, la fougueuse Luna, Nina la douce, le beau Grizzly et Pime le sauvage) pour votre indéfectible soutien.

Merci à vous tous de m'avoir permis d'éprouver autant d'émotions durant ces belles années de doctorat.

## Table des matières

<b>1. ET LES MICROTECHNIQUES ENTRENT DANS L'HISTOIRE .....</b>	<b>12</b>
<b>2. VERS UNE MICRO-USINE AUTOMATIQUE ET MODULAIRE.....</b>	<b>16</b>
2.1 MICROPRODUIT.....	17
2.2 SPECIFICITES DE LA MANIPULATION DANS LE MICROMONDE .....	21
2.3 SYSTEME DE PRODUCTION DEDIE AU MICROMONDE .....	26
2.4 CONTEXTE D'AUTOMATISATION .....	37
2.5 VERS UN MICROSYSTEME DE PRODUCTION AUTOMATISEE .....	51
2.6 PROBLEMATIQUE DU SYSTEME D'INFORMATION : (LE « BESOIN ») .....	57
2.7 CONCLUSION .....	59
<b>3. DEFINITION DU SYSTEME D'INFORMATION DE LA MICRO-USINE .....</b>	<b>60</b>
3.1 CONCEPTS ET ETAT DE L'ART DES SYSTEMES D'INFORMATION DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	61
3.1.1 <i>Le PLM</i> .....	61
3.1.2 <i>Le concept de système d'information</i> .....	64
3.1.2.1 Généralités .....	64
3.1.2.2 Système d'information industriel : Le CIM .....	65
3.1.2.3 L'ERP - PGI - .....	65
3.1.2.4 Le MES.....	67
3.1.2.5 L'OS.....	71
3.1.2.6 Le stockage par bases de données .....	72
3.2 MODELISATION DES SI PAR UML.....	75
3.3 CARACTERISATION DU SI DE LA MICRO-USINE AVEC UML .....	77
3.4 DEFINITION DE L'ARCHITECTURE DU SI AVEC UML.....	84
3.4.1 <i>La cellule</i> .....	84
3.4.2 <i>La PFP</i> .....	91
3.4.3 <i>L'IHM</i> .....	93
3.4.4 <i>La micro-usine</i> .....	99
3.5 CRITERES D'EVALUATION DE LA MODULARITE.....	102
3.6 CONCLUSION SUR LE SYSTEME D'INFORMATION DE LA MICRO-USINE .....	106
<b>4. MISE EN ŒUVRE DE LA VALIDATION DU PILOTAGE .....</b>	<b>107</b>
4.1 CONTEXTE EXPERIMENTAL .....	109
4.1.1 <i>Première base expérimentale</i> .....	111
4.1.1.1 Synthèse des taux de réussite et des durées expérimentales.....	124
4.1.2 <i>Deuxième base expérimentale</i> .....	125
4.1.2.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales.....	126
4.1.3 <i>Troisième base expérimentale</i> .....	130
4.1.3.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales.....	130
4.2 SIMULATION ET VALIDATION DE MODELES DE SI .....	138

4.2.1	<i>Description du simulateur d'évolution d'une micro-usine</i> .....	139
4.2.1.1	Le réseau de Petri au cœur du simulateur .....	139
4.2.1.2	La partie émergée du simulateur .....	144
4.2.1.3	Une analyse statistique de la répétabilité .....	144
4.2.2	<i>Exploitation des résultats de simulation</i> .....	147
4.2.3	<i>Les résultats de simulation</i> .....	148
4.2.3.1	Aperçu des résultats de simulations pour les trois cas .....	151
4.2.3.2	Comparatif de l'aspect connaissance et analyse sur le savoir-faire .....	154
4.2.3.3	Comparatif de l'aspect temporel et analyse temporelle .....	156
4.2.3.4	Conclusion sur les simulations .....	159
4.3	VERS UNE IMPLEMENTATION DES MODELES EN VUE DU PILOTAGE .....	163
4.4	CONCLUSION SUR LA MISE EN ŒUVRE DE LA VALIDATION .....	166
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>167</b>
5.1	CONCLUSION TECHNIQUE .....	168
5.2	PERSPECTIVES .....	169
<b>6.</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>171</b>
6.1	ANNEXE 1 : TABLEAU DE CRITERES D'EVALUATION .....	171
6.2	ANNEXE 2 : LES SUPPORTS TECHNIQUES DISPONIBLES .....	174
	<i>Le PC embarqué tel que le PC/104</i> .....	6.2-174
	<i>Carte avec OS temps réel</i> .....	175
	<i>Microcontrôleur</i> .....	175
	<i>FPGA</i> .....	176
	<i>DSP</i> .....	178
	<i>Quid de la biologie ?</i> .....	179
6.3	ANNEXE 3 : MODELES UML SUPPLEMENTAIRES .....	183
6.4	ANNEXE 4 : CALCUL DES COEFFICIENTS DE LA LOI POLYNOMIALE DES TAUX DE PROGRESSION DE LA CONNAISSANCE .....	193
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>194</b>
7.1	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	194
7.2	BIBLIOGRAPHIE GENERALE .....	198
	<b>CURRICULUM VITAE</b> .....	<b>203</b>
	FORMATION .....	203
	EXPERIENCES PROFESSIONNELLES .....	203
	PUBLICATIONS .....	204
	SESSIONS POSTER .....	205
	DISTINCTIONS .....	205
	<b>RESUME</b> .....	<b>206</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>206</b>

## Table des figures

1.1 – Technologie MEMS pour le nano-drone libellule de Silmach SA, société bisontine.....	13
1.2 - Schématisation de notre méthodologie de travail .....	15
2.1 - Méthodologie de travail, étape de présentation de l'état de l'art du micromonde.....	16
2.2 - Exemples de MOEMS : motorisations, engrenages et miroirs microscopiques [San].....	18
2.3 - Assemblage MEMS 3D produit par Zyvex Co [Hol06] .....	19
2.4 – Exemple de MOEMS 2 ½ D : microspectromètre [Pop09].....	19
2.5 - Exemple de micromanipulation biologique [Sak07] .....	20
2.6 - Sonde d'endoscopie - diam. ext. 2,8 mm - [Oga98].....	20
2.7 – Le Gecko [Aut00, Aut02] et son sosie robotique adhérent à une surface « lisse » [San08].....	22
2.8 – Synthèse des ordres de grandeur des dimensions relatives au micromonde [Rak06].....	23
2.9 – Synthèse des ordres de grandeur des forces relatives au micromonde [Rak06] .....	24
2.10 - Importance relative des coûts en Design For Micro-Assembly [Ben00] .....	24
2.11 – Synthèse des expérimentations menées dans le micromonde [LamP10] .....	25
2.12 - Exemple de ligne de production pour l'assemblage de mécanismes de montres [Ata02] .....	27
2.13 - Exemple de dextérité horlogère pour manipulation-assemblage -arc Jurassien-.....	28
2.14 - Exemple de banc de positionnement à 13 ddl, SmartAct GmbH .....	28
2.15 - Exemple de microrobot, Kleindiek [Nan] .....	29
2.16 – Hexapode, mini-actionneur et tables, PI - Physik Instrumente – [PI].....	29
2.17 – Equipement de micromanipulation motorisée et table XY, Newport Corporation.....	29
2.18 - Usine miniaturisée en mallette [Tan01].....	31
2.19 - Vues des postes miniaturisés [Tan01] .....	31
2.20 - Mini-roulement à billes fabriqué par l'usine miniature [Tan01].....	32
2.21 - Centre miniaturisé d'usinage de voiles minces [Oka02] .....	32
2.22 - Exemple d'usinages minces : épaisseur 50 et 20 µm x hauteur 2 mm, et nid d'abeilles de pas 4 mm x profondeur 2 mm .....	33
2.23 - Système d'assemblage de micro-produits optiques [Oga98].....	33
2.24 - Système de téléopération - projet Nedo-Olympus [Oly99] - .....	34
2.25 - Micro-usine expérimentale MITI [Ata02] .....	34
2.26 - Mini-machine électrochimique et empreinte du pignon obtenu - MITI - .....	35
2.27 - Deux bras de micropositionnement de l'unité de traitement - MITI - .....	35
2.28 - Unité de convoyage inter-postes - MITI - .....	36
2.29 - Vue de la mini-usine du consortium japonais DeskTopFactory [DTF].....	36
2.30 – Engrenage microscopique à train épicycloïdal plan, Harbin - Chine [Xie05] .....	38
2.31 - Vue de la cellule de Harbin, Chine et son principe d'architecture de pilotage [Sun05] .....	38
2.32 - Vues du projet allemand « MiniProd - Advanced Modular Micro-Production System » .....	39
2.33 - Vues des projets suisses de "Microbox" et "Pocket Factory" .....	40
2.34 - Vue du microrobot suisse "Pocket Delta" et exemples d'implantation.....	41
2.35 - Vue d'un robot parallèle delta du Pr. Clavel - EPFL - .....	41
2.36 - Vue d'ensemble de la plateforme finlandaise de micro-assemblage et son environnement contrôlé en température et humidité.....	42

2.37 - Vues simulées et réelles de la plate-forme finlandaise de micro-assemblage [Zho01] .....	42
2.38 - Vue du projet finlandais « TOMI » - Towards Mini and Micro Assembly Factories - .....	43
2.39 - Principe d'une construction de vue virtuelle par transfert trifocal.....	43
2.40 - Exemple d'application du transfert trifocal à la micro-manipulation .....	44
2.41 - Exemples de construction d'une grande image par mosaïques .....	44
2.42 - Exemple d'application d'une construction dynamique de mosaïque à la micromanipulation .....	45
2.43 - Calibration visuelle et micromanipulation automatique asservie visuellement .....	45
2.44 - Vues de la micropince "MMOC" [Clé05, Agn03] et ses organes terminaux "SiFit" [Agn09] .....	46
2.45 - Vue d'actionneurs piezo [Bre98] et leur mise en oeuvre dans le "tring module" [Rak06].....	46
2.46 - Vue d'une micro-pince piezo à capteurs intégrés [Gro09] .....	47
2.47 - Vue d'un microactionneur à AMFM - Alliage à Mémoire de Forme Magnétique - [GauJY07] ....	47
2.48 - Vue d'un mécanisme flexible et piezoélectrique de convoyage [Par08].....	47
2.49 - Vue d'un micro-gripper à glace [LoW08].....	48
2.50 - Vue d'un capteur de force à flottaison magnétique [Che09]. .....	48
2.51 - Exemple de micropince à 4 ddl, par mécanisme 5 barres bi-actionné, publication USA-Suisse - B.Nelson - [Gre05] .....	48
2.52 - Vue du projet hollandais MA3MST de TNO à environnement localement contrôlé et sa capsule hermétique.....	49
2.53 – Aperçu des travaux actuels du Pr Fatikow .....	49
2.54 - Projet américain de mini-usine de "pick and place" assisté par vision, issu du projet "Agile Assembly Architecture" .....	50
2.55 - Projet américain de micro-usine "µ3 Microfactory Cleanroom " à ARRI Texas .....	50
2.56 - Présentation de la structure du concept de micro-usine.....	52
2.57 - Proposition de description des constituants d'une micro-usine .....	54
2.58 - Vue d'ensemble de la station de téléopération du projet PRONOMIA .....	55
2.59 - Détail de la zone de travail de la station du projet PRONOMIA.....	55
2.60 - Vue d'artiste du concept de micro-usine télé-opérée [Oga98].....	55
2.61 – Micro-usine "µ3" de micro-assemblage, à ARRI's Texas [Pop09] et son IHM haptique .....	56
3.1 - Méthodologie de travail, étape de définition de la stratégie de commande.....	60
3.2 - Schématisation de l'Entreprise Numérique .....	61
3.3 - Schématisation d'un PLM.....	63
3.4 - Pyramide du CIM.....	65
3.5 - Positionnement de notre étude dans la « pyramide » du modèle CIM .....	68
3.6 – « Marguerite » des onze fonctions MES définies par l'ISA-95 .....	69
3.7 - Exemple de MES chez Danone, procédé de fermentation pour yaourt : visuels du synoptique de supervision et architecture réseau, technologie SchneiderElectric, d'après logiciel MESboxSCADA d'ordinal .....	70
3.8 - Les six fonctions MES retenues parmi les onze de l'ISA-95.....	78
3.9 - Diagramme principal des cas d'utilisation de la micro-usine .....	79
3.10 - Diagramme d'état de la micro-usine par production .....	80
3.11 - Diagramme des cas d'utilisation du système d'organisation de la production .....	82
3.12 - Méthodologie de travail, étape de formalisation, définition de l'architecture des données.....	84
3.13 - Principe de la structure physique d'une cellule .....	85

3.14 - Diagramme des classes d'une cellule de micro-usine .....	86
3.15 - Exemple de blocs élémentaires modulaires passifs-compliants ou piézo-actifs, pour la synthèse de mécanismes compliants avec FlexIn, CEA-LIST UFC-femto-st-AS2M [Gro09].....	87
3.16 - Exemple d'une micropince construite par modules, CEA-LIST UFC-femto-st-AS2M [Gro09] ...	87
3.17 - Diagramme des classes de construction d'une cellule .....	88
3.18 - Diagramme d'états relatif à la composition d'une structure modulaire de production .....	89
3.19 – Eléments actifs de type « Micropince MMOC » à 4 ddl et ses organes terminaux « SiFiT » passifs.....	90
3.20 - Principe de la structure organique d'une cellule .....	91
3.21 - Schéma de principe de la micropince optique utilisant des flux de convection [Why06].....	95
3.22 - Vue d'une séquence de micromanipulation téléopérée par IHM optique .....	96
3.23 - IHM haptique à retour de force spatiale sur micro-pince optique [Pac09] .....	96
3.24 - IHM Exemple d'un gant et d'un stylet haptique, zoom sur une matrice tactile - piezoélectrique ou à polymère -, et capteur thermique matriciel à effet Peltier.....	98
3.25 - Diagramme global des classes de la micro-usine.....	99
3.26 - Méthodologie de travail, étape d'identification des propriétés et d'évaluation des critères .....	102
4.1 - Méthodologie de travail, étape de validation.....	107
4.2 - Assemblage complet simulé de microcomposants à doubles encoches .....	111
4.3 - Assemblage expérimental incomplet de doubles encoches .....	112
4.4 – Simulation d'assemblage rigide bien qu'incomplet de doubles encoches .....	113
4.5 – Aperçu des microcomposants à assembler pour Micronora, en clin d'œil régional .....	114
4.6- Micro-composants de la microvache et séquençement des opérations de micro-assemblage ..	116
4.7 - Apparition d'un couple de basculement .....	117
4.8 - Couple de basculement dépendant de la largeur .....	118
4.9 - Couple équivalent induisant une rotation –accélération angulaire- .....	119
4.10 - Vue MEB et microscope de la microvache assemblée - 0,16 x 0,32 x 0,56 mm <sup>3</sup> ep 5 µm - ....	122
4.11 – Aperçu du support d'insertion compliant - à trois ressorts – .....	125
4.12 – Aperçu des chanfreins et du jeu d'insertion de 3 µm dans un assemblage à double encoche	125
4.13 - Assemblage complet et multiple de simples encoches par asservissement visuel .....	126
4.14 – Description des mobilités de la station SAMMI .....	126
4.15 – Vue du préhenseur sphérique et la micro-bille - et deux reflets - .....	133
4.16 – Vue de microgouttes condensées sur un cube de silicium .....	136
4.17 – Vue surprenante de l'opération d'assemblage pyramidal de 11 billes de Ø 50 µm en polystyrène et vue de la technologie de pipette utilisée .....	137
4.18 - Le RdP aléatoire - stochastique - et T-temporisé simulé avec PACE .....	139
4.19 – Exemple type de lois polynômiales pour les taux de progression du ParamExpe .....	143
4.20 - Vue du pupitre de simulation avec PACE .....	144
4.21 - Le réseau d'exécution en boucle de la simulation aléatoire pour permettre une analyse statistique.....	145
4.22 – Le réseau de Petri global et détails de sa composition .....	146
4.23 – Visualisation des taux de progression de la connaissance pour les cas A, B et C lors de succès, reconfiguration et réorganisation .....	149
4.24 – Tableau de synthèse des conditions initiales des simulations des cas A, B et C .....	150

---

4.25 – Visualisation 3D et frontale des résultats bruts des simulations des cas A, B, C .....	153
4.26 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par connaissance.....	155
4.27 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par durée .	158
4.28 – Visualisation des répartitions statistiques des résultats de simulations des cas A, B, C.....	160
4.29 - Illustration de l'interface graphique de l'AP2M.....	164
4.30 - Méthodologie de travail, étape d'implémentation.....	165
6.1 – Vue d'un PC/104 avec triple empilage .....	6.2-174
6.2 – Vue de micro-contrôleurs .....	176
6.3 – Vue d'un FPGA de chez Altera et sa multitude de connecteurs .....	178
6.4 – Vue d'un DSP de chez Motorola et ses nombreux connecteurs.....	179
6.5 - Neurones de rat cultivés sur un réseau de transistors en silicium recouverts de poly-L-lysine. P. Fromherz, Max-Planck-Institute for Biochemistry / The Journal of Neuroscience .....	181
6.6 - Neurone de limace - Lymnaea stagnalis - posé sur la neuropuce mise au point par Infineon : 16384 capteurs au mm <sup>2</sup> enregistrent tout signal électrique émis par des neurones vivants. ....	181
6.7 - Réseau de neurones mécaniquement stabilisé sur puce de silicium .....	182
6.8 – Diagramme des cas relatifs à l'acquisition des spécifications de production.....	186
6.9 – Vue générale des classes composant la gestion de l'organisation.....	190
6.10 – Diagramme des classes composant les opérations du système d'organisation.....	191
6.11 – Vue générale des principales classes de la micro-usine .....	192



# 1. Et les microtechniques entrèrent dans l'Histoire

## - Préface -

Nos travaux s'inscrivent dans la thématique de recherche de l'équipe SAMMI - Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage - du département AS2M de l'Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174. Cette dernière se consacre à ses systèmes et apporte des solutions conceptuelles et technologiques à l'automatisation de tâches de production pour l'industrie du micromonde.

L'Homme a toujours observé et tâché de comprendre son environnement, tenter de déceler ces mécanismes de fonctionnement pour en tirer parti et ainsi améliorer son quotidien. Les mathématiques et le calcul sont nés, ainsi que la science et la physique... sans jamais vraiment s'éloigner de la philosophie, voire de la religion lorsque les principes n'étaient pas apparents !

D'importants travaux et de nombreuses théories élaborées en astronomie, d'Aristote à Galilée, ont été menés sur l'infiniment grand. Puis, au XVIIème siècle, les systèmes qui nous côtoient quotidiennement furent progressivement décryptés par Pascal, Leibniz et Newton. Le XXème siècle marque le lien entre la grande dimension et l'exploration du quantique posé par Einstein.

La recherche scientifique dans le domaine du petit s'immisce dans divers secteurs : la biologie, la médecine, les techniques électrique, micro-électronique et optique, la micromécanique ont trouvé leur place dans de nombreuses équipes de recherche à travers le monde pour créer la technologie MEMS - Systèmes Micro-Electro-Mécaniques [[Pet82](#)] -, les MOEMS - Systèmes Micro-Opto-Electro-Mécaniques - et les BioMEMS - Systèmes Micro-Electro-Mécaniques et Biologique, qui, par définition, interagissent avec le vivant, végétal ou animal -. Une autre branche de ces microsystèmes concerne les applications chimiques en s'appuyant, par exemple, sur les récents travaux de microfluidique [[Eri09](#), [Jun02](#)]. La continuité de ces technologies interdisciplinaires aboutit à l'intégration de microscopiques systèmes artificiels, réunis sous l'appellation « micromécatronique ».

Cette ingénierie du « micromonde » n'est qu'à l'aube de sa vie ; elle révolutionne déjà les inventions humaines et développe chaque jour de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire. Pour comprendre l'intérêt de la réduction de taille, il est

indispensable de maîtriser l'étonnant principe du « facteur d'échelle » qui sera détaillé au § 2.2.

L'industrie des microtechniques est à l'aube de sa vie, avec déjà à son compte l'horlogerie haut de gamme et ses inédits mouvements mécaniques et automatiques. Il me plaît à penser que *« ce serait bénéfique pour tout le monde, y compris pour la planète, si, plutôt que d'avoir recours à de lourds avions<sup>1</sup>, l'on pouvait disposer de drones miniatures<sup>2</sup> riches en électronique, MEMS et MOEMS mais pesant quelques grammes voire kilogrammes »*.



### 1.1 – Technologie MEMS pour le nano-drone libellule de Silmach SA, société bisontine

L'explosion programmée du marché du micro requiert d'ores et déjà des moyens de production à grandes échelles adaptés aux produits microscopiques. Mais de telles infrastructures ne permettent pas, à l'heure actuelle, la mise en œuvre automatique de petites et moyennes productions de microproduits et de prototypes de validation. Le recours permanent à des opérateurs humains pratiquant de nombreuses étapes de téléopération s'avère très coûteux et chronophage. Dans un proche avenir, le

<sup>1</sup> L'A380 pèse quasiment six cent tonnes au décollage, il faut compter avec vingt-cinq tonnes pour un Rafale de Dassault, et près de deux tonnes pour l'Ecureuil d'Eurocopter.

<sup>2</sup> Drones bio-inspirés ; à l'image du gabarit d'une libellule [\[Sil\]](#) voire d'une cigogne de quatre kilogrammes, tout au plus d'un albatros de douze kilogrammes adepte du « vol plané dynamique » pour profiter du gradient de vent en mer et ainsi économiser son énergie.

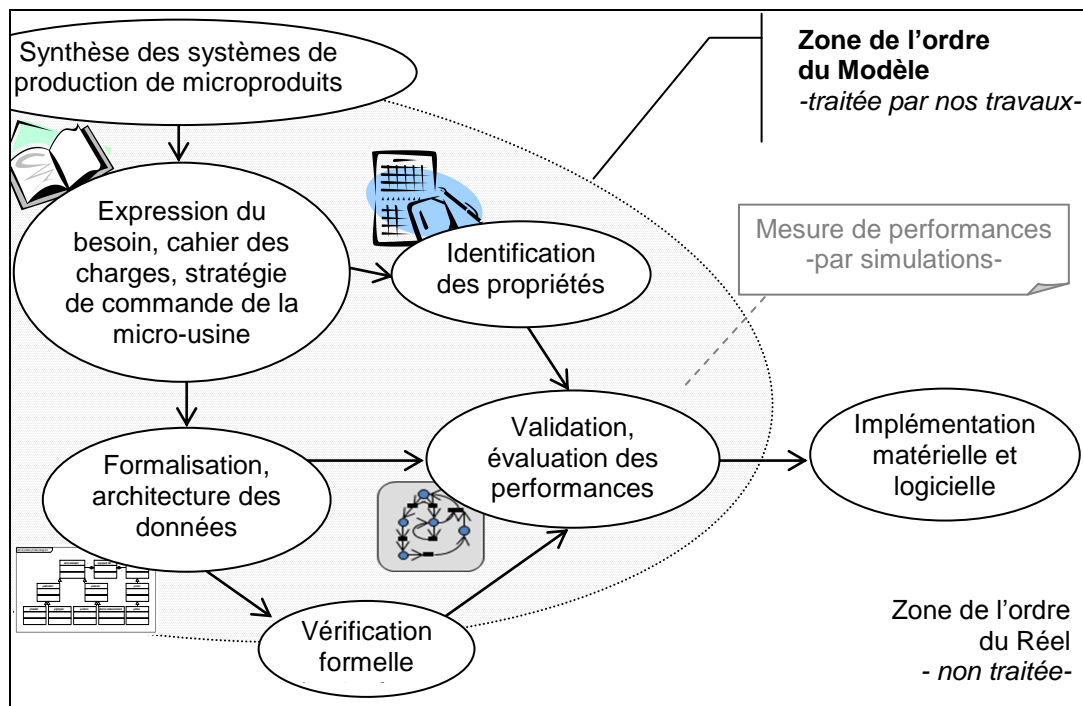
destin d'un microsystème de production automatisé, modulaire et réorganisable permettant le traitement successif de diverses fabrications est promis à un succès fulgurant.

Dans un contexte particulier pour la production industrielle, dû à la physique inhabituelle du micro-monde responsable du comportement aléatoire des micro-manipulations, la position de nos travaux participe à définir l'architecture de commande et du système d'information dans ces microsystèmes de production automatisés et modulaires appelés micro-usines. Nous nous attachons également à situer notre contribution dans l'application du concept à la micromanipulation et au micro-assemblage au sein d'une micro-usine réorganisable et reconfigurable.

Pour cela, la démarche de recherche que nous avons suivie est scientifiquement classique. Nous avons traité la partie de l'ordre du modèle qui consiste à définir tout d'abord une stratégie de commande, puis à formaliser l'architecture des données, à en extraire les propriétés par identification et enfin valider la solution avec une simulation des performances selon divers scénarii. Parallèlement, une vérification formelle et syntaxique, intrinsèque au modèle, est confiée au LIFC - Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche-Comté [[Des07](#)] -.

Enfin, la partie de l'ordre du réel, relative à l'implémentation matérielle et logicielle permettant la mise en œuvre de la micro-usine, n'a pas été directement traitée par nos travaux, mais initiée au sein du laboratoire [[Hér07](#)] nous en rapporterons les conclusions.

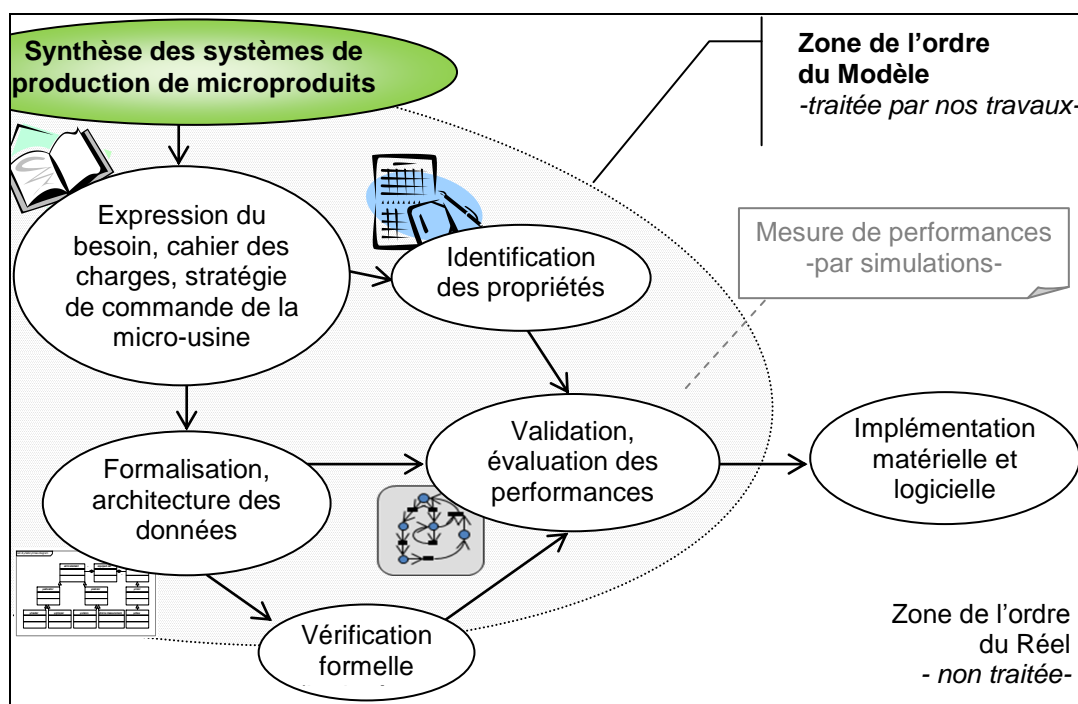
Pour faciliter l'assimilation de notre travail, nous proposons (fig 1.2) une représentation graphique de notre méthodologie ; cette dernière est ensuite rappelée lors des principales charnières du présent manuscrit.

**1.2 - Schématisation de notre méthodologie de travail**

## 2. Vers une micro-usine automatique et modulaire

### - Introduction -

Ce chapitre situe le contexte scientifique et technologique de la problématique que nous nous sommes fixée (fig 2.1). Nous allons tout d'abord définir la notion de microproduit (§ 2.1). Ensuite, nous détaillerons l'ensemble des spécificités relatives à la manipulation dans le micromonde (§ 2.2) ainsi que celles inhérentes à un système de production dédié (§ 2.3). Nous serons alors en mesure de présenter le contexte d'automatisation (§ 2.4) puis de nous orienter vers une synthèse à travers un microsystème modulaire de production automatisée (§ 2.4.2.5). Enfin, nous terminerons ce chapitre par la définition du besoin à travers la présentation de la problématique intrinsèque et essentielle à une telle micro-usine, la problématique du système d'information (§ 2.6).



2.1 - Méthodologie de travail, étape de présentation de l'état de l'art du micromonde

## 2.1 Microproduit

Un microproduit se caractérise tout d'abord par son enveloppe dimensionnelle dont la taille de ses largeur, hauteur et profondeur est comprise entre un micromètre et un millimètre. Ainsi, son volume minimum est de l'ordre du micromètre cube alors qu'au maximum, il vaut un millimètre cube. Notons au passage qu'il existe donc un facteur  $10^9$ , soit un milliard entre ces deux volumes. Un tel microproduit remplit une -voire plusieurs- fonction mécanique, électrique, optique, fluide ou encore chimique et biologique. A ce titre, il arrive qu'il soit obtenu par l'agrégation de ce que l'on convient d'appeler des microcomposants, voire parfois des micro-sous-assemblages.

La conception d'un microproduit à partir de plusieurs microcomposants est, à l'heure actuelle, généralement imposée par la provenance de différentes technologies. A titre d'exemple, la production à partir de « wafer » permet d'obtenir des microcomposants de géométries planes, fins, qui, par assemblage, permettent d'obtenir à leur tour des micro-objets spatiaux que l'on appelle alors « en deux dimensions et demi ».

Cependant, l'indispensable opération d'assemblage, pourtant aisément concevable à échelle humaine, requiert une réelle aptitude à la micromanipulation dès que l'on passe à l'échelle microscopique nécessite obligatoirement une assistance pour agir et capter des informations.

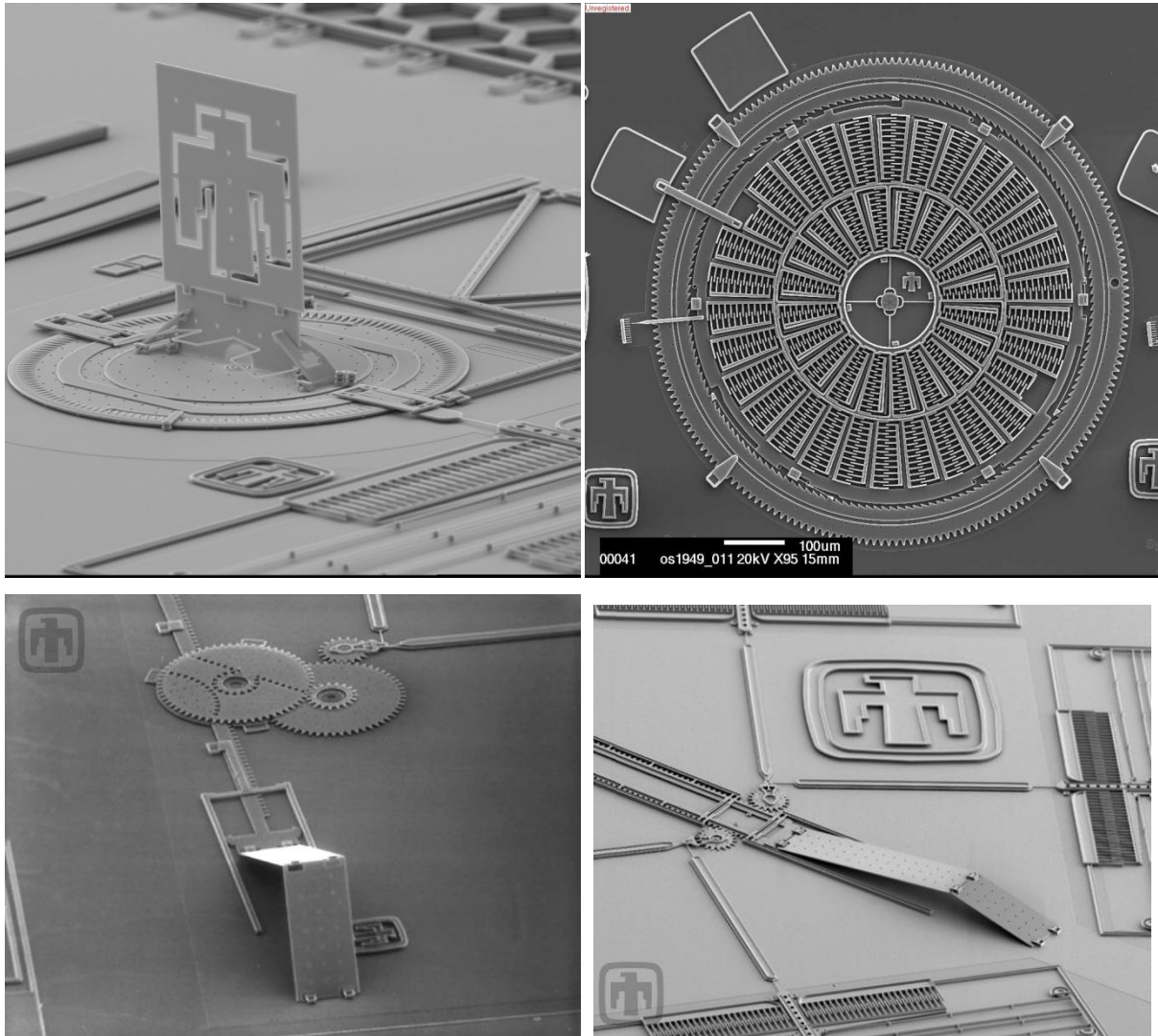
De tels microsystèmes sont communément appelés des « MEMS » ou « MOEMS », par la communauté scientifique du domaine : MEMS pour Micro-Electro-Mechanical-Systems, MOEMS pour Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems.

Une extension à l'échelle de taille inférieure amène la communauté scientifique à découvrir un nouveau champ technologique, celui des NEMS - pour Nano-Electro-Mechanical-Systems -. Deux champs spécifiques sont également à rapprocher des MEMS : les « BioMEMS » s'intéressent aux MEMS qui interagissent avec le monde biologique du vivant, animal ou végétal, et la microfluidique consiste à mettre en œuvre des MEMS qui conditionnent des liquides -également transposables à des gaz via quelques évolutions- [[Bay05](#), [Com05](#)].

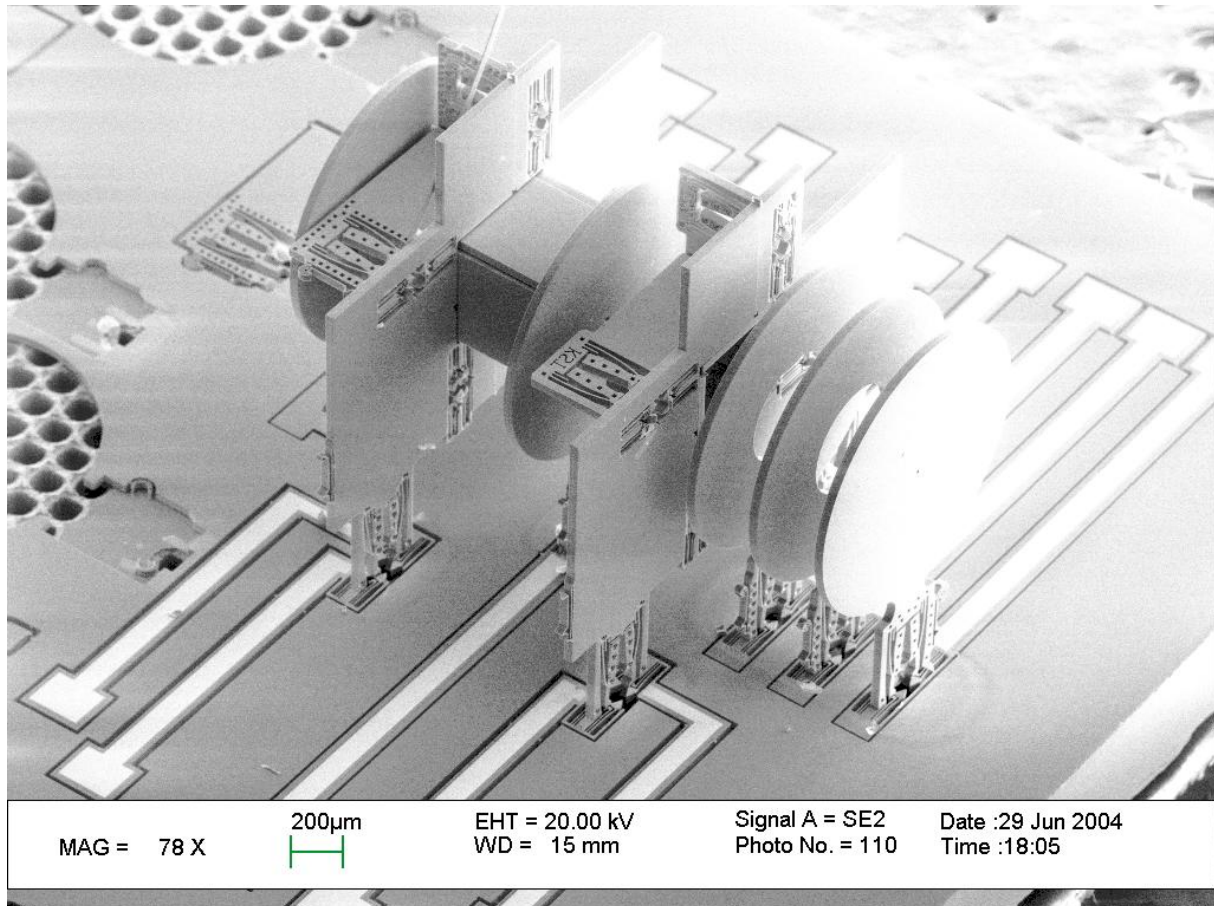
En ce qui concerne les MEMS, de nombreux travaux permettent de mesurer des caractéristiques des actuels microproduits. Les microcomposants provenant



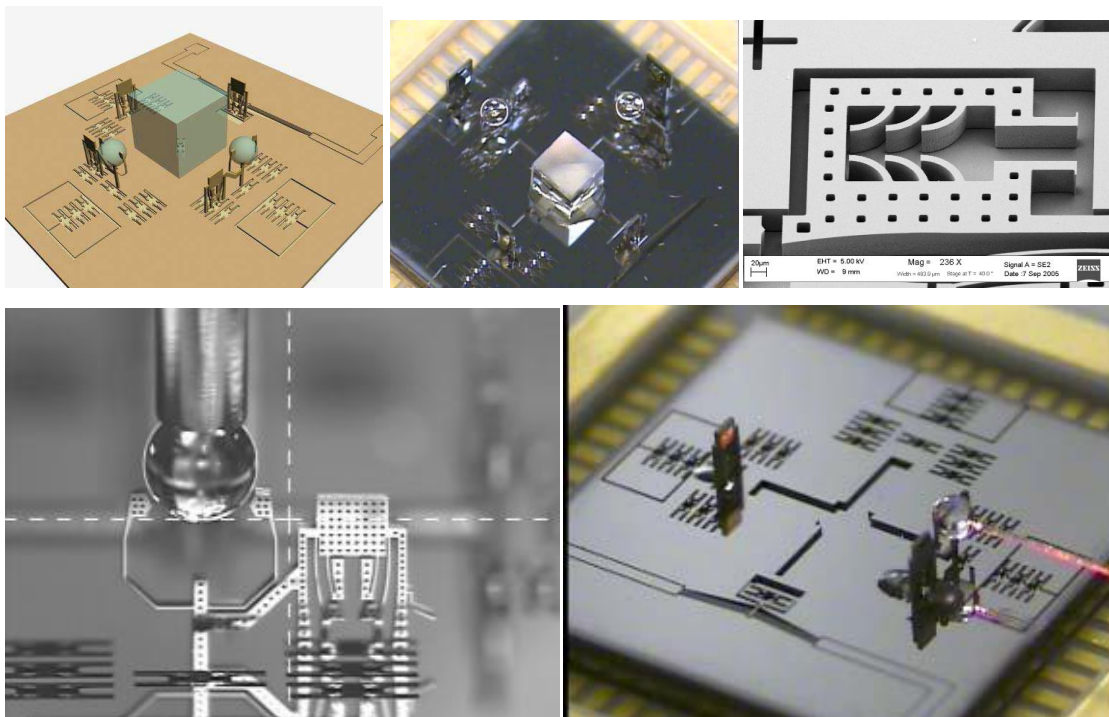
éventuellement de différentes technologies ou de technologies planes obtenues par strates font appels à diverses solutions d'assemblage leur assurant des liaisons à amplitude de déplacement finie, sans jeu, grâce à d'importantes déformations ou à une solidarisation par collage.



**2.2 - Exemples de MOEMS : motorisations, engrenages et miroirs microscopiques [San]**

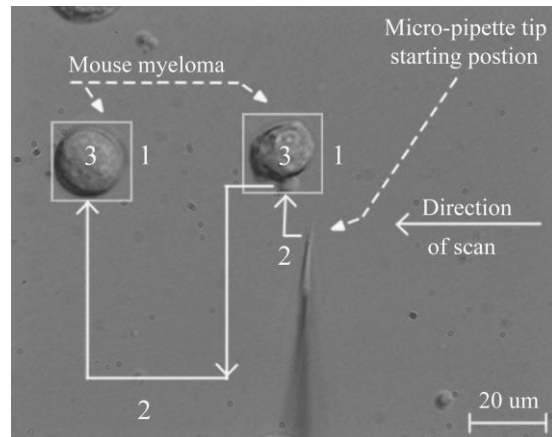


2.3 - Assemblage MEMS 3D produit par Zyvex Co [[Hol06](#)]



2.4 – Exemple de MOEMS 2 ½ D : microspectromètre [[Pop09](#)]





## 2.5 - Exemple de micromanipulation biologique [Sak07]

La figure précédente montre un cliché pris au microscope montrant les chemins souhaités pour l'algorithme de mise en mouvement d'une micropipette de micro-injection dans un myélome de souris - mesurant approximativement 20  $\mu\text{m}$  de diamètre -. [Sak07]

Une taille aussi réduite, en regard des objets qui côtoient habituellement au quotidien l'espèce humaine, fait intervenir des efforts d'origine surfacique très largement négligeables pour les objets de plus grande taille. A contrario, les efforts d'origine volumique, intervenant en temps normal sur les objets de taille habituelle pour les humains, sont très largement réduits au sein du micromonde. Une telle inversion des proportions nécessite de nouvelles connaissances et un réel apprentissage pour le commun de nos concitoyens amené à intervenir lors de la fabrication de tels microproduits.



## 2.6 - Sonde d'endoscopie - diam. ext. 2,8 mm - [Oga98]

La sonde d'endoscopie est l'un des premiers produits ayant servi de support au développement du concept de micro-usine. Notons qu'un tel système représente une dimension importante dans le contexte du micromonde, qu'il est à considérer en marge de notre domaine puisqu'ayant plutôt sa place dans la catégorie des mini-produits.

## 2.2 Spécificités de la manipulation dans le micromonde

L'importance du facteur d'échelle est une des clefs de l'appropriation du micromonde par l'être humain qui n'y est naturellement pas préparé.

Le facteur d'échelle est un ratio qui se définit sur une unique dimension lorsqu'on agrandit ou réduit un objet, si bien que pour une surface, par principe bi-dimensionnelle, l'intervention du ratio apparaît au carré, et, pour un volume forcément en trois dimensions, c'est au cube qu'agit le facteur d'échelle.

Prenons, par exemple, un chat adulte de taille moyenne. Ce félin, long d'environ une cinquantaine de centimètres et large d'une dizaine, pèse en moyenne cinq kilogrammes. Nous pouvons estimer à vingt cinq dm<sup>2</sup> la surface de sa peau (ndr : vingt cinq dm<sup>2</sup> de douceur de fourrure ! ).

Tout d'abord, grossissons le cinq fois dans toutes les directions. Nous obtenons alors un « bestiau » long de deux mètres cinquante, large de plus de cinquante centimètres, pesant cent-vingt-cinq fois plus que notre matou, soit la maudite masse de six cent vingt-cinq kilogrammes pour une superficie de fourrure seulement vingt-cinq fois plus importante, de six cent vingt-cinq dm<sup>2</sup>.

Ensuite, rétrécissons notre mammifère d'un facteur d'échelle de cinq. La longueur de cette nouvelle « bestiole » sera bien entendu cinq fois plus petite, à savoir une dizaine de centimètres de long pour deux petits centimètres de large, alors que sa masse est réduite d'un facteur cent vingt-cinq ; il atteint juste quarante grammes pour une surface de peau de un dm<sup>2</sup>.

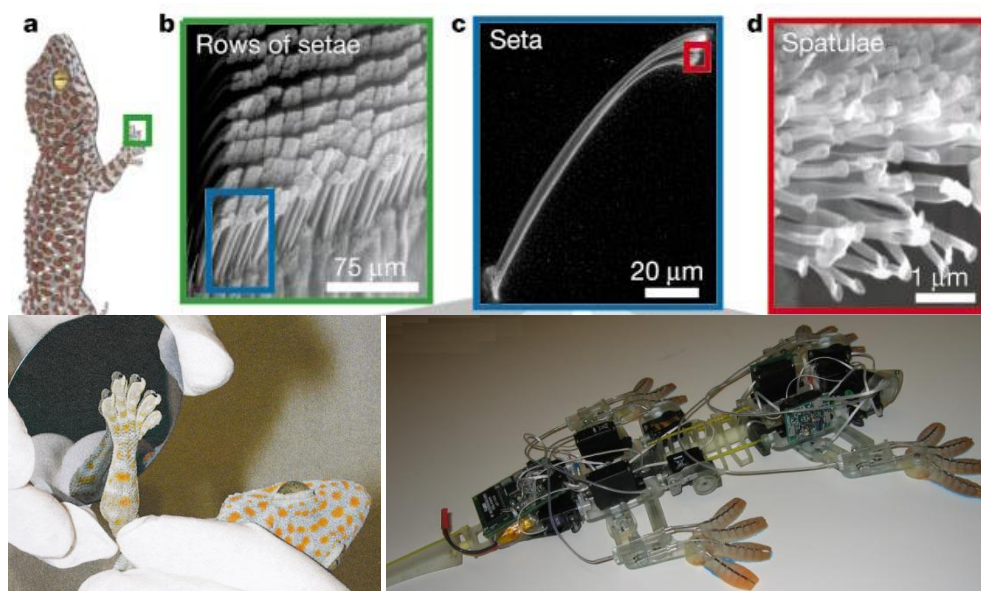
A travers ces trois mammifères, le minou, le bon vieux nounours polaire menacé par notre réchauffement malgré son record de poids à plus de 1100 kg, et le sympathique lémurien, ou encore l'écureuil voire la chauve-souris - ou pourquoi pas... l'incroyable gecko -, nous ne pouvons que constater l'impact énorme de la relation de variation du volume par la surface. Alors que ce ratio est cinq fois plus important pour l'ours que pour le chat, il l'est cinq fois moins pour la chauve-souris que pour ce même chat.

En conséquence, alors que l'ours polaire est massif, lourd et utilise son poids pour faire céder la glace et ainsi écraser puis dévorer les phoques surpris en plein repos, le chat compte quant à lui sur sa vitesse et son agilité pour tromper les petits rongeurs. Et notre bestiole, qu'elle soit lémurien - tel le colugo -, écureuil - tel l'écureuil volant de la famille des Pteromyinae -, ou chauve-souris - de l'ordre des

chiroptères -, a développé d'énormes aptitudes à se déplacer dans le fluide environnant, ce fluide gazeux : l'air... - ce formidable et juste mélange vital composé entre autre de 21% de di-oxygène, de 78 % d'azote, de moins de 1% d'argon et juste ce qu'il faut de CO<sub>2</sub>, moins de 0,04 %... juste ce qu'il faut pour l'instant, mais c'est un autre débat ! -.

Cette évolution du ratio de variation du volume par la surface a permis à notre bestiole de chasser les insectes et surtout de se déplacer voire de fuir par les airs soit en « vol plané » pour les lémurins, écureuils ou autres geckos, soit encore en « vol actif » pour les belles chauve-souris capables de vaincre la pesanteur en l'air, mais finalement incapables de se mouvoir sur leurs pattes, tellement la nature a parié sur leur légèreté, si ce n'est en rampant lentement ce qui leur confère une extrême vulnérabilité.

Si nous avons introduit ici le gecko qui est un reptile et non pas un mammifère, c'est pour une autre de ses prouesses dans le micromonde : la présence de ses « spatulæ » (sur ses « setæ », eux-même sur ses « lamellæ») qui exploitent les forces surfaciques de Van der Waals et lui autorisent l'ascension de surfaces lisses [[Aut00](#), [Aut02](#)]. De telles prouesses sont prises en exemple par le domaine de la robotique bio-inspirée [[San08](#)].



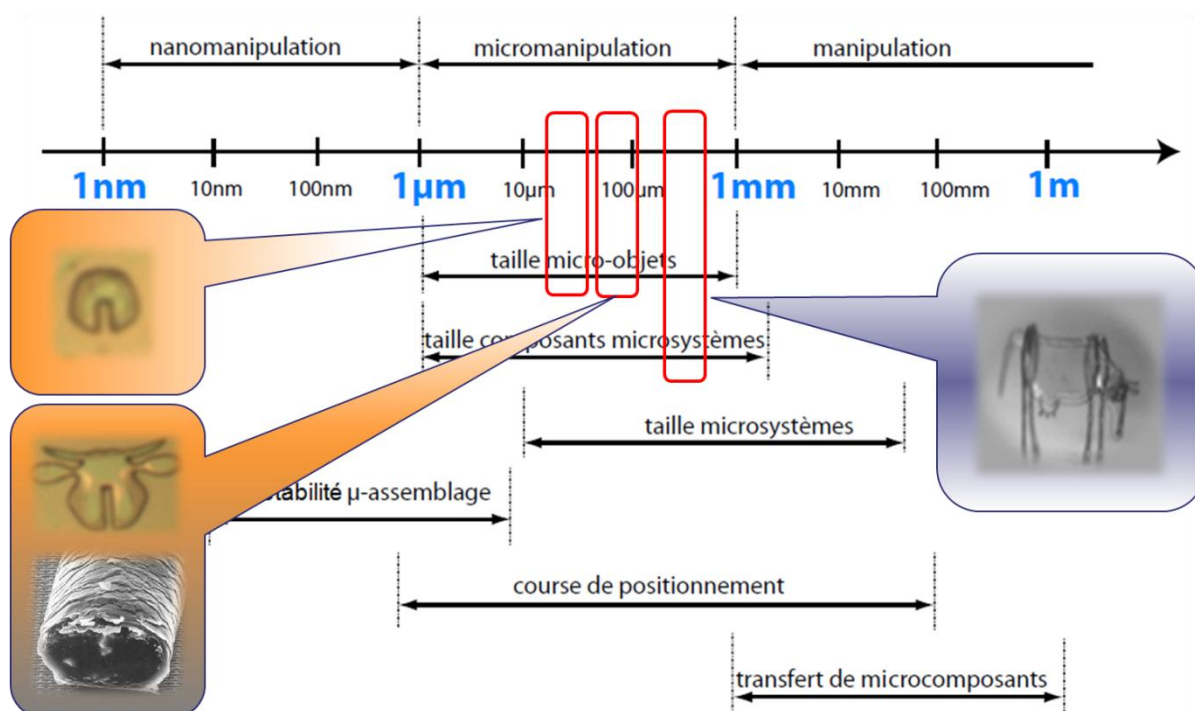
**2.7 – Le Gecko [[Aut00](#), [Aut02](#)] et son sosie robotique adhèrent à une surface « lisse » [[San08](#)]**

L'évidence ainsi décrite de l'évolution de l'action du volume - de la masse - ou de la surface, en fonction de l'échelle à laquelle on se situe, a d'autant plus d'importance avec les objets de taille micrométrique à millimétrique que le facteur d'échelle est de cent à cent mille fois plus petit que celui considéré pour notre respectable chauve-

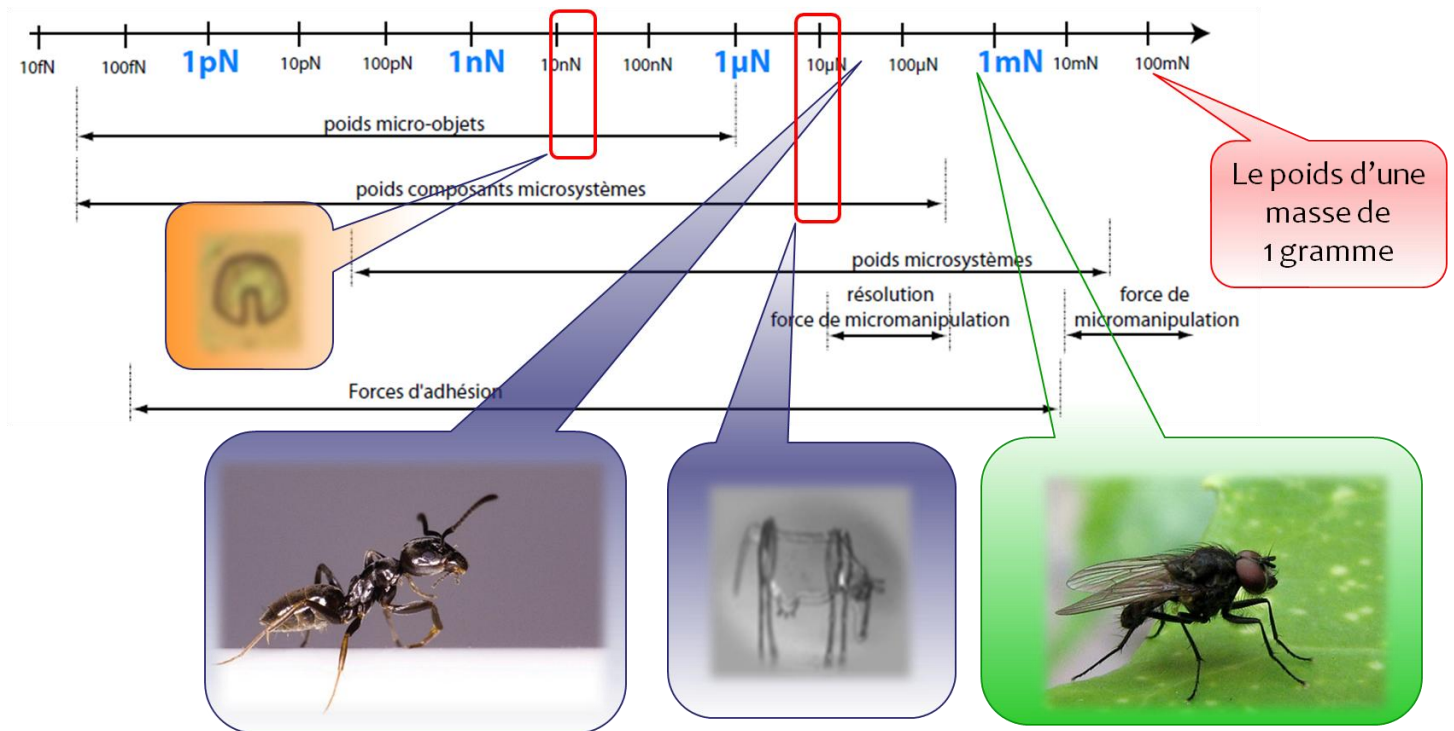
souris et son acolyte de gecko. Et, par conséquent, en tant qu'humain - de gabarit intermédiaire entre celui du chat et de l'ours polaire -, notre expérience à ces échelles est inexistante et nécessite un apprentissage et le développement de savoir-faire spécifiques, de techniques et de technologies propres, dédiées.

Dès lors, la diffusion de la technologie adaptée au micromonde requiert impérativement une assistance à la mise en œuvre des scénarii de production, à la réalisation d'opérations et tout simplement à la manipulation. Et pour cause, les limites sensorielles directes d'un corps humain ne permettent pas d'acquérir les informations nécessaires pour mener par la suite une micro-action : la perception visuelle directe et l'aptitude tactile directe ne permettent ni de sentir ni détecter des irrégularités inférieures à 50  $\mu\text{m}$ . Concernant les actions musculaires directes telles que les oscillations - sortes de micro-spasmes - et tremblements dont sont victimes les mains de l'opérateur, elles ne permettent pas une dextérité manuelle suffisante, la précision maximale pouvant être obtenue étant estimée à 100  $\mu\text{m}$ .

Les figures 2.8 et 2.9 permettent une appropriation des ordres de grandeurs des plages de dimensions et de forces caractéristiques du micromonde [Rak06]. Nous situons sur ces figures des microcomposants et un microproduit démonstratif qui seront exploités dans la suite du manuscrit ; il s'agit de l'assemblage d'une microvache dont nous voyons les composants formant le museau et la tête (de la taille d'un cheveu).

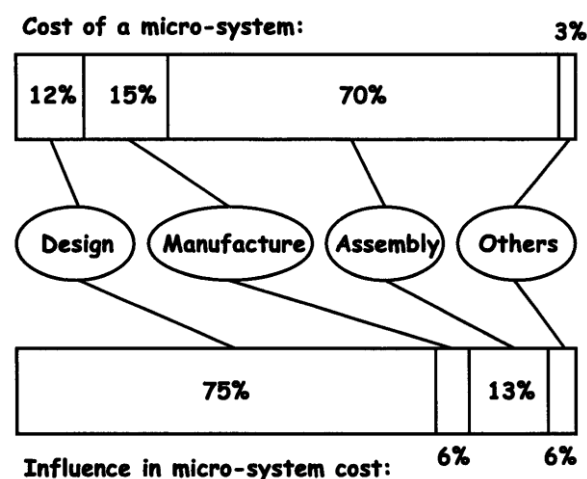


2.8 – Synthèse des ordres de grandeur des dimensions relatives au micromonde [Rak06]



2.9 – Synthèse des ordres de grandeur des forces relatives au micromonde [Rak06]

En 2000, les travaux de l'EPFL [Ben00] ont mis en évidence l'importance de l'impact de la conception - « design » - d'un microproduit sur son coût d'assemblage. Cette relation est maintenant connue des microtechniciens sous l'acronyme DFμA pour la contraction de « Design For Micro-Assembly ».



2.10 - Importance relative des coûts en Design For Micro-Assembly [Ben00]

La thèse présentée également par l'EPFL en 2008 par Mélanie Dafflon [Daf08] est une référence quant à la présentation des efforts intervenant en micromanipulation –

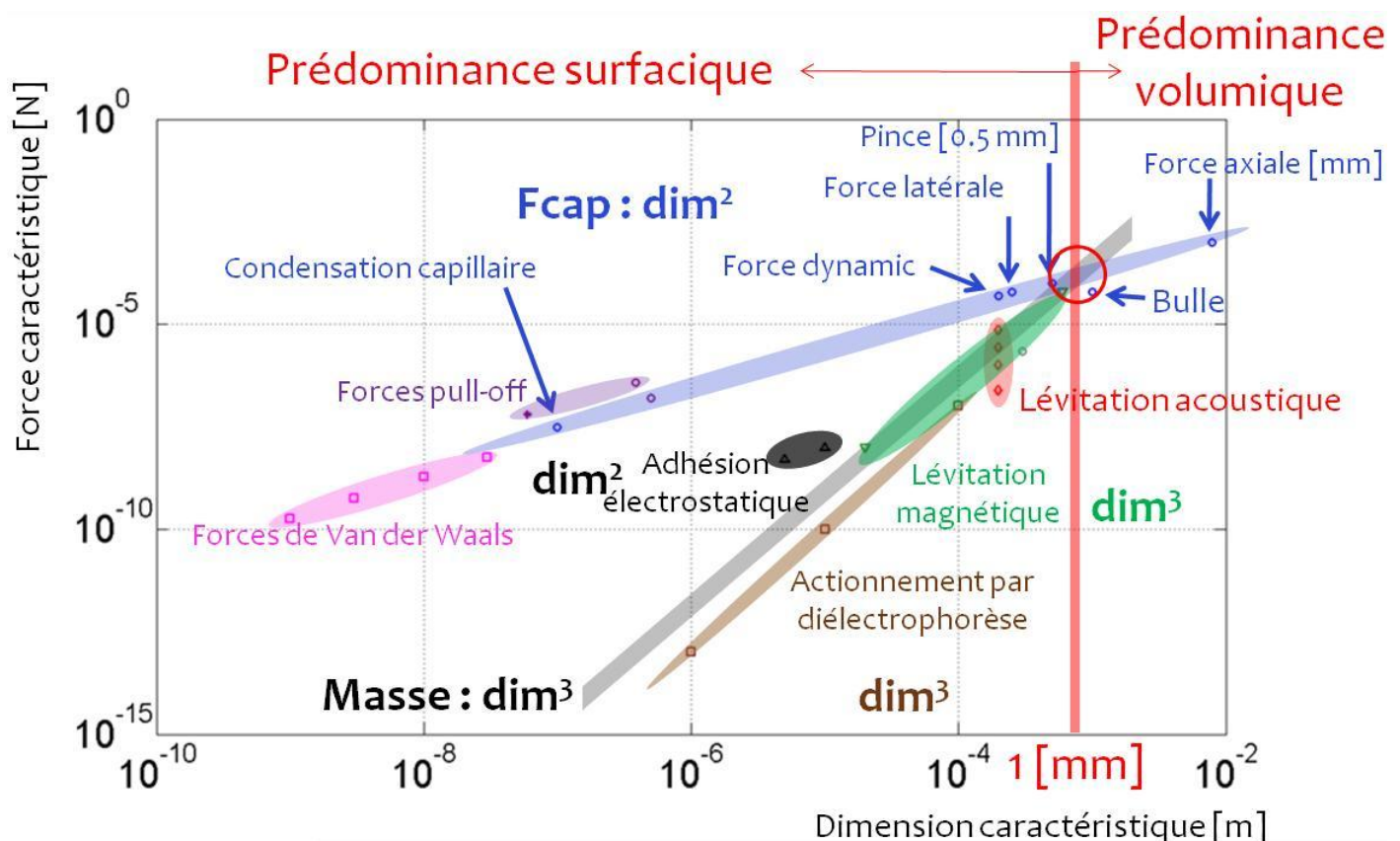


nous aurons l'occasion d'y revenir pour l'étape de simulation, § 4.1.3 -. En regard des forces volumiques, on y relève l'effective prépondérance des forces surfaciques dites de Van des Waals, de capillarité, électrostatiques, hydrodynamiques.

Nos confrères belges de l'ULB contribuent également fortement à la modélisation des efforts surfaciques prépondérants dans la micromanipulation [Cha07, LamP03] ou la conception de vannes de microfluidique [Len08, Len09]. La figure de synthèse, tirée de la soutenance des travaux d'HDR de Pierre Lambert, permet une vue globale des travaux et des ordres de grandeurs associés [LamP10].

L'identification de ces efforts représente une première difficulté qui s'efface avec la mesure des efforts en présence. Une plateforme spécifique de mesure de ces micro et nano-forces a été récemment développée au sein de femto-st AS2M [Che09].

Les travaux de Mickaël Paris [Par08] menés dans notre laboratoire sur la problématique d'alimentation d'une micro-usine en microcomposants, démontrent, quant à eux, la possibilité d'obtenir malgré tout un déplacement par friction et inertie.



2.11 – Synthèse des expérimentations menées dans le micromonde [LamP10]

## 2.3 Système de production dédié au micromonde

Un système de production adapté aux microproduits doit principalement disposer d'une aptitude à la productivité, nécessitant une disponibilité importante, un volume de production conséquent et une grande fiabilité.

Un système de production dédié au micromonde a pour finalité la mise en œuvre d'une production à partir d'un petit volume de pièces prototypes, et jusqu'à sa fiabilisation, une robustesse du procédé adapté à une série beaucoup plus grande.

Prenons comme exemple le milieu de l'horlogerie mécanique : l'existant fait état d'assemblage manuel ou partiellement automatisé sur certains composants standardisés. Ces interventions manuelles nombreuses pour l'assemblage d'un mécanisme complet requièrent savoir-faire et disponibilité qui justifient en grande partie la situation de ces mécanismes dans le domaine du luxe.

A contrario, la microélectronique, à l'image des composants intégrés ou des cartes électroniques de type circuits imprimés - dont les séries de production sont généralement très grandes -, est principalement dotée de lignes d'assemblage dédiées et peu enclins à accueillir de nouvelles technologies pour l'essai d'une petite série de prototypes.

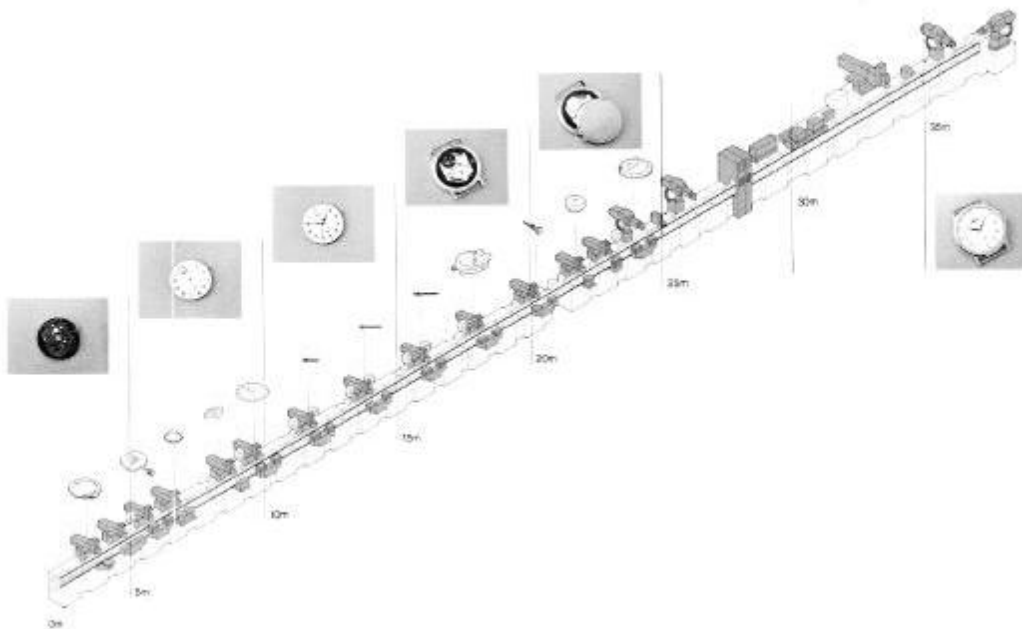
Compte-tenu du contexte actuel, national et mondial, où l'énergie est au cœur de l'équilibre économique et à l'origine d'une importante lutte d'influence, nous devons plus que jamais développer des techniques à faible consommation. En effet, d'une part, le baril de pétrole atteint périodiquement des valeurs jusque-là jamais vues, et d'autre part, la pollution engendrée par la combustion des énergies fossiles remet en cause l'équilibre planétaire qu'il soit climatique et biologique, mais également à fort impact sanitaire et social dans les pays les plus pauvres.

Par ailleurs, la signature du « pacte écologique » de M. Nicolas Hulot par des millions de Français oriente principalement le débat énergétique vers une consommation raisonnée et une réduction des gaspillages pour limiter au plus juste la production d'énergie.

A ce titre, le concept de système de production dédié au micromonde que nous proposons est en phase avec le besoin exprimé par l'actuelle conjoncture. Du point

de vue purement énergétique, l'adaptation du système de production à la taille du produit permet une réelle diminution de l'impact de ces nouvelles technologies en terme de pollution, réduction du gaspillage : la consommation énergétique d'un robot industriel classique de « pick and place » n'est-elle pas sans commune mesure avec celle utilisant une technologie piezo ou AMF ? Certes les amplitudes de déplacements sont généralement moindres, mais justement bien suffisantes pour une application d'ordre microscopique. La consommation énergétique principale d'un robot industriel traditionnel est imputable aux actionneurs qui accélèrent et décélèrent les masses importantes de sa propre structure en regard des composants manipulés, donc à la partie opérative. Dans une cellule de production micro, la consommation d'énergie est équilibrée entre la partie commande et celle opérative, voire inversée - ...du moins pour l'instant encore -.

Actuellement, l'industrie du petit s'appuie sur une production de masse pour laquelle les lignes de production sont dédiées, souvent longues et énergivores. La ligne illustrée par la figure 2.12 mesure 40 m et chaque bras robotisé pèse 250 kg.



2.12 - Exemple de ligne de production pour l'assemblage de mécanismes de montres [[Ata02](#)]



A l'opposé, lorsque la série requiert une faible quantité de produits, la manipulation et l'assemblage font appel à un opérateur humain dont la compétence métier est indispensable. C'est par exemple le cas dans l'industrie de l'horlogerie de luxe.



**2.13 - Exemple de dextérité horlogère pour manipulation-assemblage -arc Jurassien-**

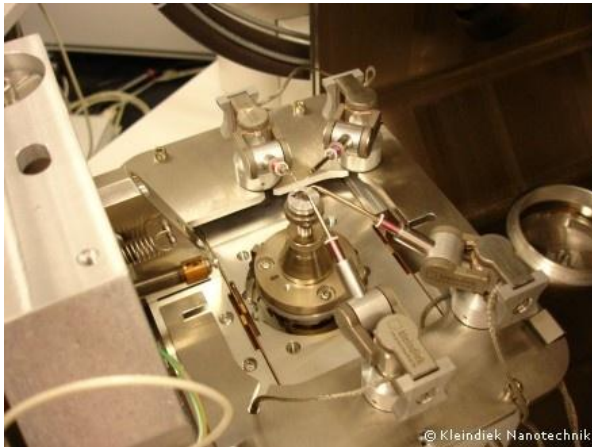
Diverses technologies de manipulation ont vu le jour ces dernières années. Elles permettent des mobilités sur un ou plusieurs axes en série ou en parallèle, tout en assurant une grande précision dans le positionnement et la résolution de ce dernier.



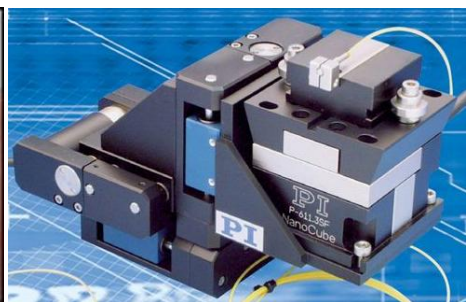
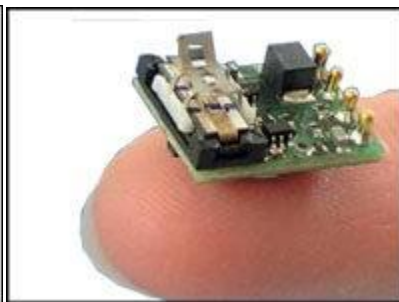
**2.14 - Exemple de banc de positionnement à 13 ddl, SmartAct GmbH**

Le système de chez SmartAct [\[Sma\]](#) illustré sur la figure 2.14 forme une station de faibles dimensions -  $80 \times 80 \times 32.5 \text{ mm}^3$  -, assez légère - 200 g - ayant un volume de travail relativement important -  $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$  - et une résolution sub-nanométrique.

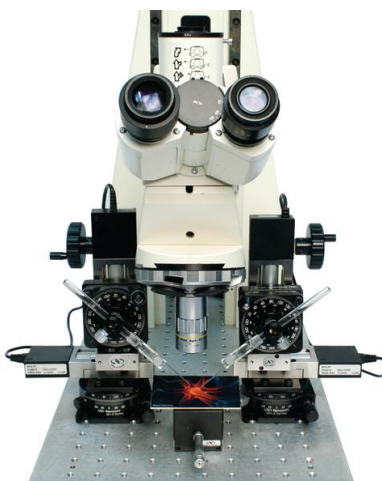
Trois autres constructeurs se partagent le marché du micro-actionnement : Kleindiek (Fig. 2.15), Physik Instrumente (Fig. 2.16) et Newport Corporation (Fig. 2.17).



2.15 - Exemple de microrobot, Kleindiek [\[Nan\]](#)



2.16 – Hexapode, mini-actionneur et tables, PI - Physik Instrumente – [\[PI\]](#)



2.17 – Equipement de micromanipulation motorisée et table XY, Newport Corporation

A l'image des salles blanches, l'environnement nécessite d'être contrôlé, régulé en permanence afin d'éviter toute perturbation susceptible de se propager. Qu'il s'agisse de poussières, de vibrations, de charges électrostatiques ou de variation du taux d'humidité, la production de microproduits requiert - à l'heure actuelle - certaines précautions indispensables pour réussir toute micromanipulation et pour s'assurer d'être en présence d'opérations reproductibles.

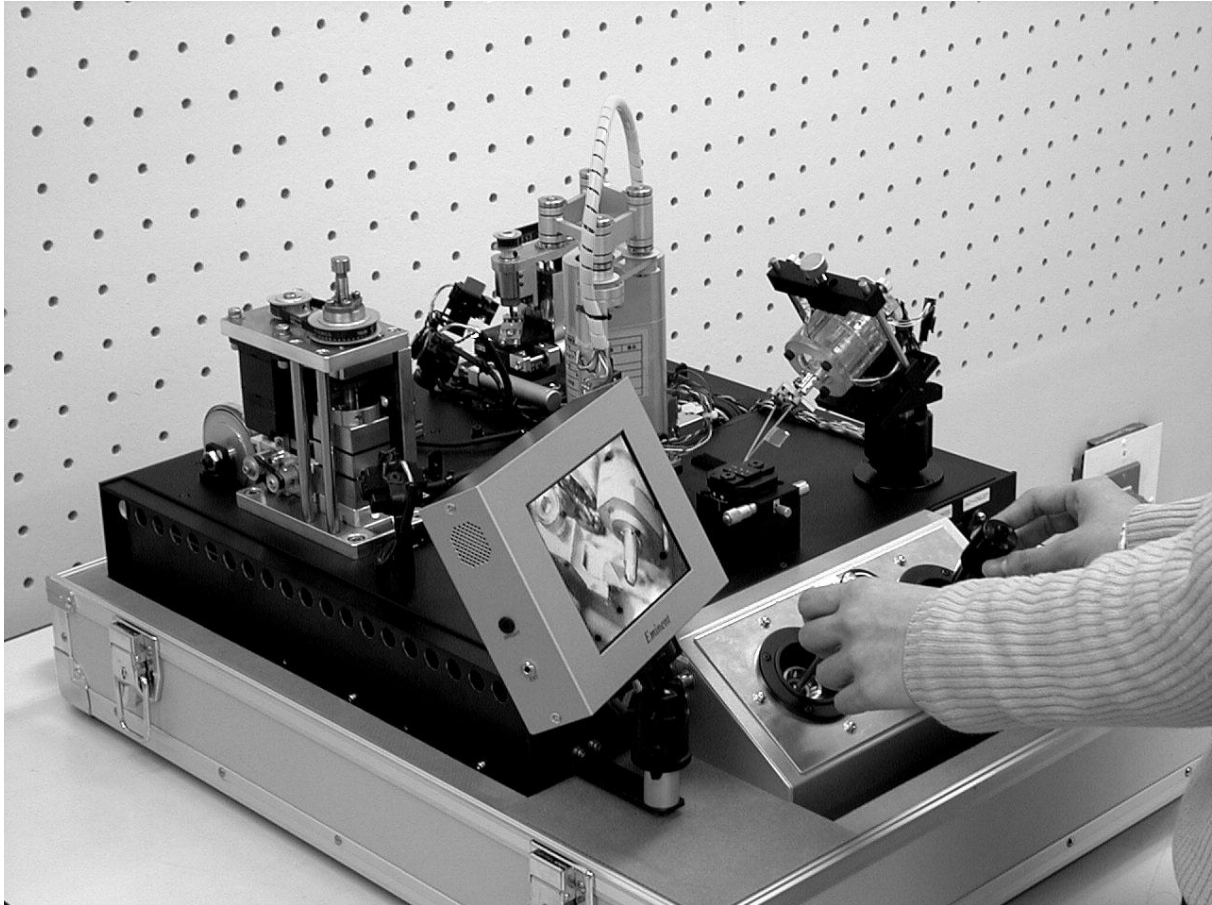
Historiquement, ce sont les chercheurs Japonais du MEL - Mechanical Engineering Laboratory - qui ont travaillé les premiers, dans les années 1990, à la réalisation d'un système de production miniaturisé. Un démonstrateur permettant la fabrication de miniroulement à billes a assuré une reconnaissance internationale au sein de la communauté scientifique. Ces premiers travaux ont initié le cahier des charges d'une micro-usine dont les grandes lignes sont toujours d'actualité : un faible encombrement et une portabilité, une faible consommation énergétique et une aptitude à la reconfiguration des moyens de production.

Les premières machines étaient en réalité des miniaturisations des habituels moyens de production. Elles permettaient la réalisation de pièces de taille millimétrique ou légèrement submillimétrique. Ainsi, le microtour présenté en 1996 [Kit98], la micro-usine en mallette [Tan01], la station « centre d'usinage à commande numérique » [Oka02] sont des systèmes télé-opérés inspirés des technologies utilisées à l'échelle méso\*.

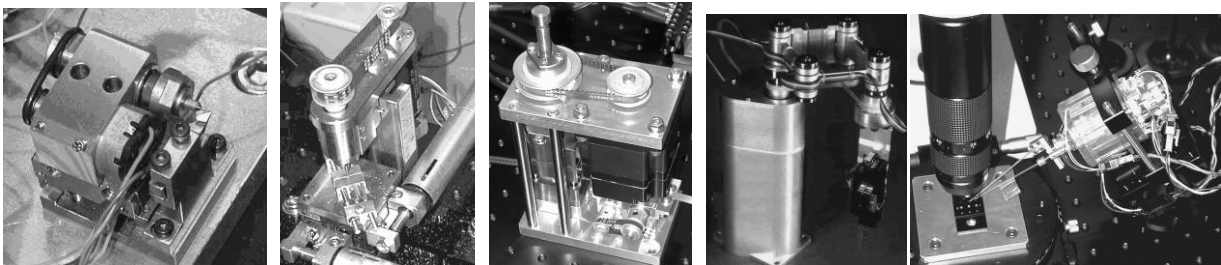
---

\* nous adoptons le terme « méso » pour définir les dimensions de l'ordre du mètre. N'étant ni dans les dimensions plus petites, ni dans les grandes dimensions en regard de la référence métrique et des habituels préfixes (ndr : déca, hecto, kilo, déci, centi, milli, micro), ce terme qui signifie « milieu » est adapté pour définir tout ce qui va du décimètre (voire centimètre) au décamètre.



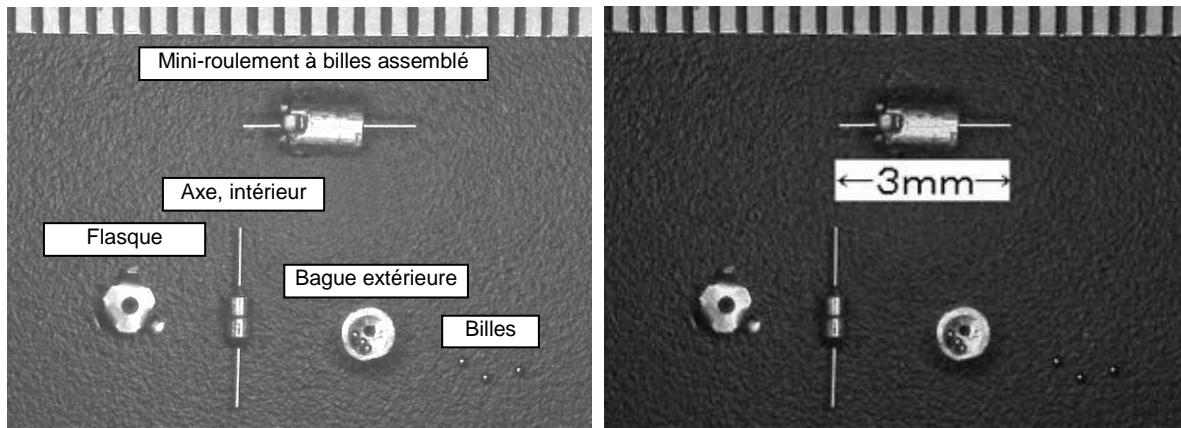


2.18 - Usine miniaturisée en mallette [Tan01]

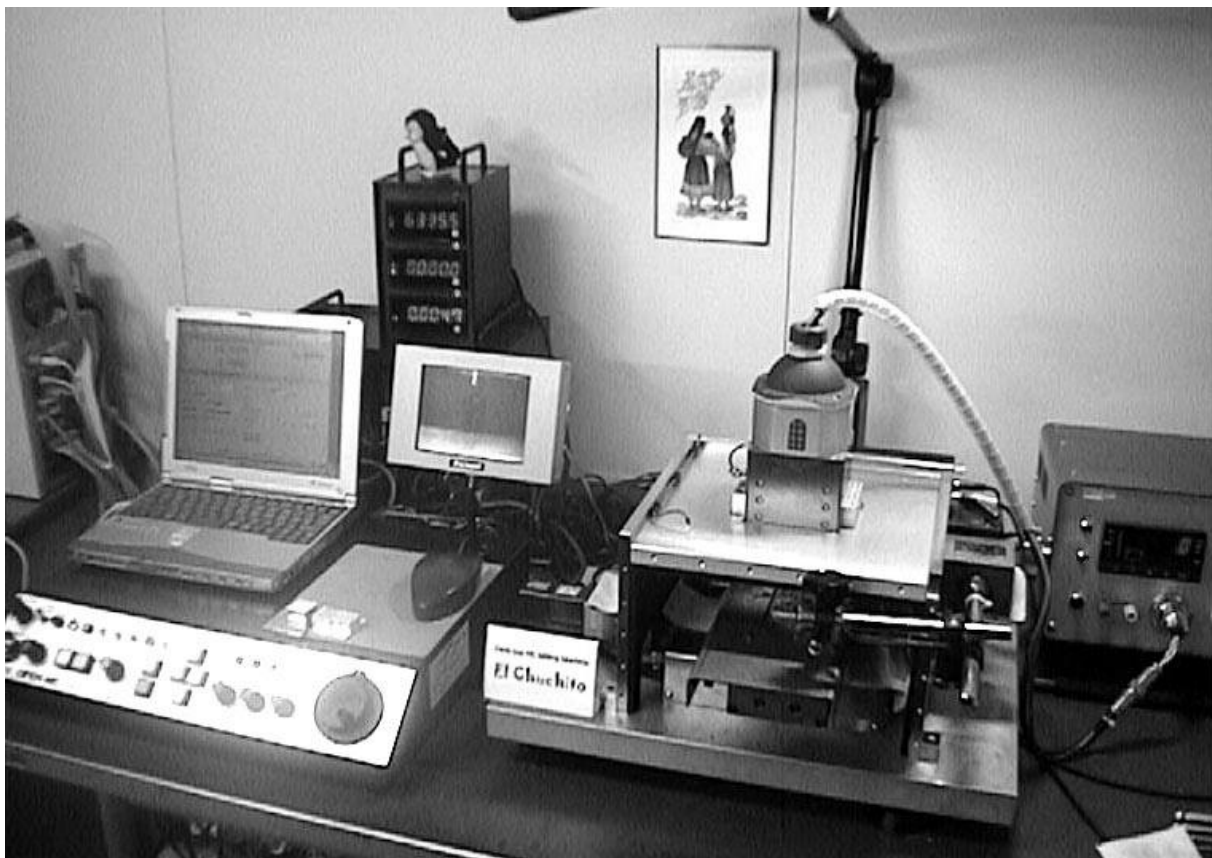


2.19 - Vues des postes miniaturisés [Tan01]

Le système de production de Tanaka est constitué de machines conventionnelles disposant de quatre postes de travail - trois postes de micro-usinage avec microtour, microfraiseuse et micropresse, et un poste de micro-assemblage dont le préhenseur est équipé d'une micropince -, ainsi qu'un système de transfert, trois mini caméras CCD, deux joysticks de télépilotage. La finalité de ce démonstrateur était de réaliser l'assemblage du mini-roulement à billes suivant - diamètre extérieur : 900  $\mu\text{m}$ , longueur : 3 mm - :



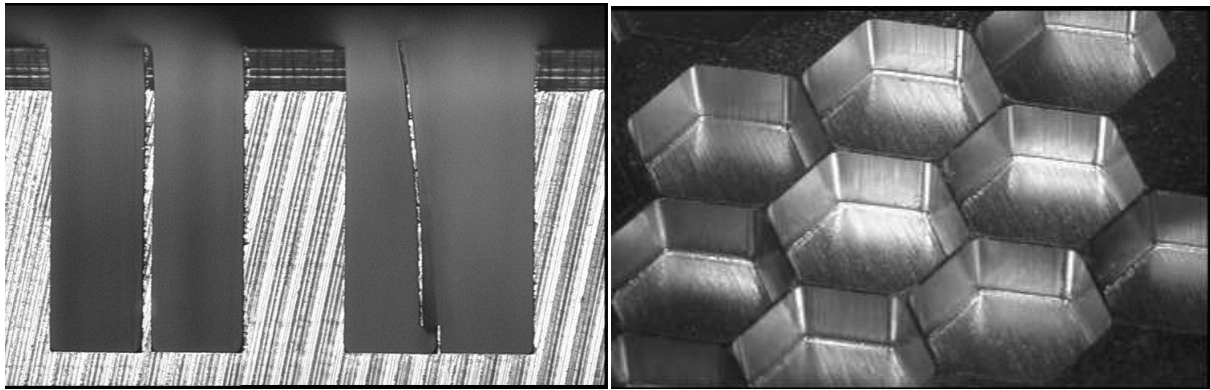
2.20 - Mini-roulement à billes fabriqué par l'usine miniature [Tan01]



2.21 - Centre miniaturisé d'usinage de voiles minces [Oka02]

Le mini centre d'usinage développé par Yuichi Okazaki (Fig. 2.21) permet la réalisation d'usinage de voiles minces - épaisseur 50 et 20  $\mu\text{m}$ , hauteur 2 mm -, et en nid d'abeilles - de pas 4 mm, profondeur 2 mm - (illustrés par la Fig. 2.22 en coupe).

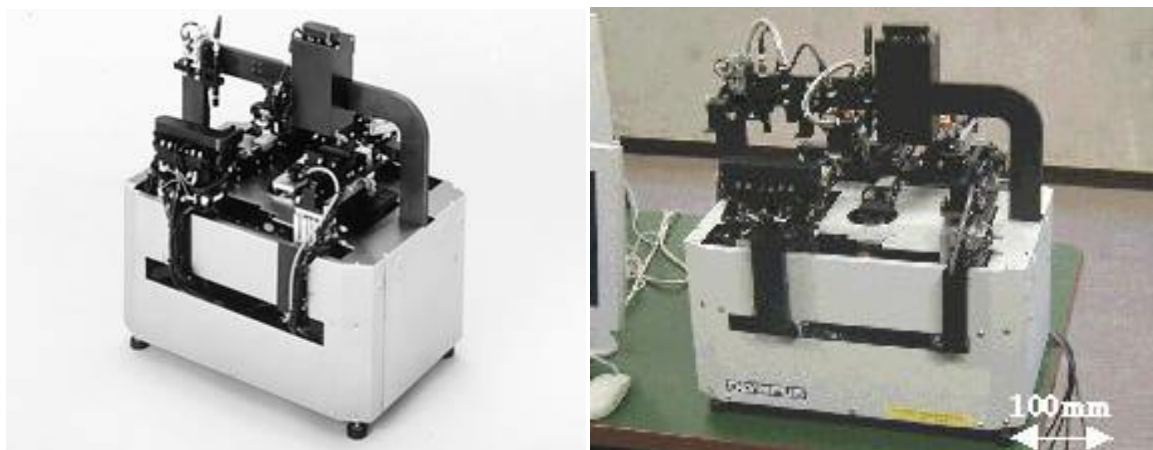




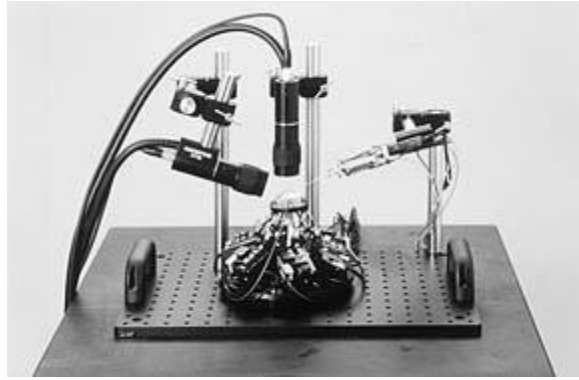
**2.22 - Exemple d'usinages minces : épaisseur 50 et 20  $\mu\text{m}$  x hauteur 2 mm, et nid d'abeilles de pas 4 mm x profondeur 2 mm**

Nous pouvons également citer les remarquables travaux de la DTU Technical University of Denmark [[Bis04](#)] qui a exploré le micro-usinage avec des outils de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre, ainsi que ceux de Laurent Guyout en micro fraisage d'aciers inoxydables 316L par du carbure de Tungstène [[Guy09](#)].

Des travaux initiés en 1991 par la société Olympus et Haruo Ogawa [[Oga98](#)] ont permis, en 1999, la présentation d'une micro-usine [[Oly99](#)] avec, d'une part, un système d'assemblage de microproduits d'optique pour endoscopes, et d'autre part, une plate-forme de micromanipulation téléopérée :

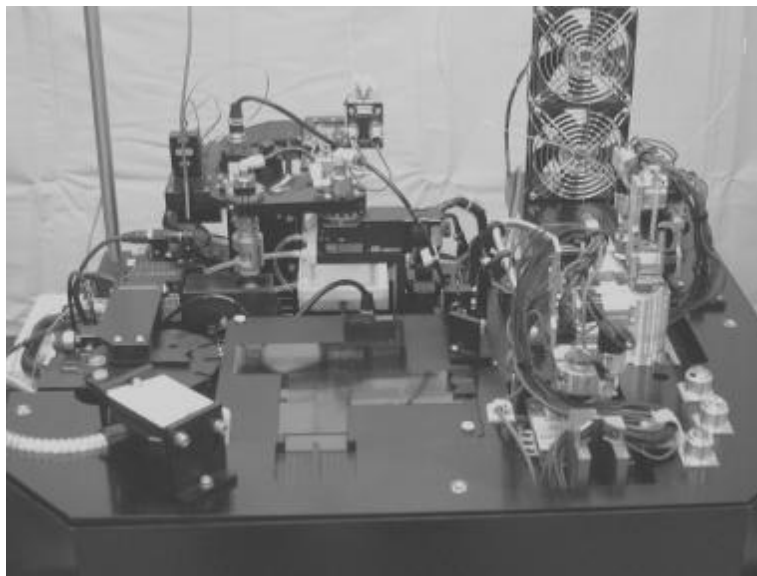


**2.23 - Système d'assemblage de micro-produits optiques [[Oga98](#)]**



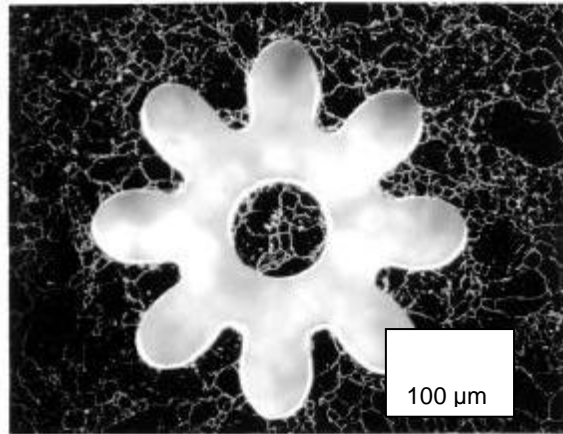
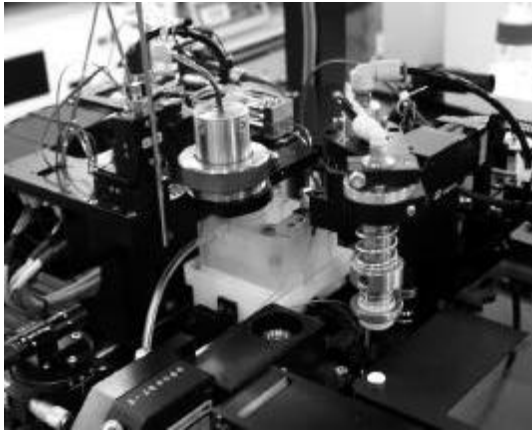
**2.24 - Système de téléopération - projet Nedo-Olympus [Oly99] -**

Le projet national japonais du MITI [Ata02] a vu naître en 2002 une illustration d'une micro-usine permettant la mise en œuvre d'opérations de transformation par assemblage, convoyage, pompage de solution, reconnaissance d'environnement, système de préhension et adhésif.



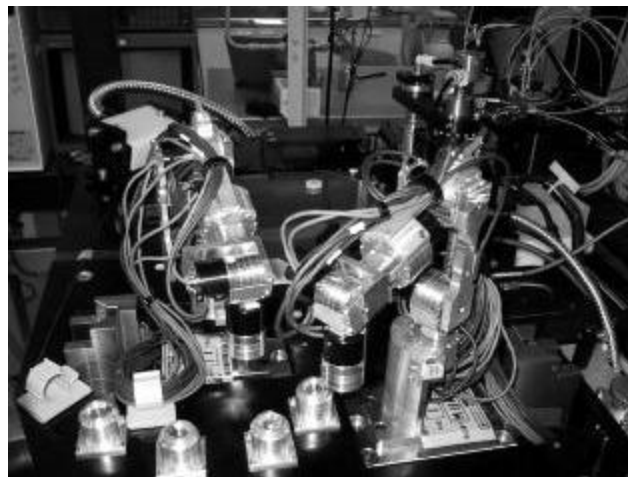
**2.25 - Micro-usine expérimentale MITI [Ata02]**

Cette unité de production met en œuvre une machine dite « électrochimique » de réalisation des pièces - ici des roues dentées - qui utilise, d'après la description qu'il en a été faite, un principe d'électroérosion.



**2.26 - Mini-machine électrochimique et empreinte du pignon obtenu - MITI -**

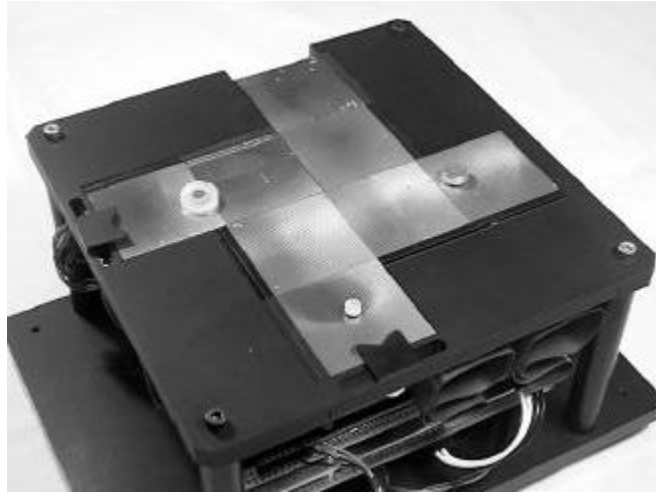
Deux bras robotisés sériels miniatures ayant chacun sept degrés de liberté et une précision de positionnement de 40  $\mu\text{m}$  sont assistés d'un micro-servo-actionneur précis au demi-micromètre.



**2.27 - Deux bras de micropositionnement de l'unité de traitement - MITI -**

L'unité de convoyage permet la mobilité en deux dimensions de masses maximales de un gramme disposées sur des palettes, à une vitesse de dix millimètres par seconde grâce à une matrice de 12800 actionneurs électromagnétiques - 40x40x8 -.





**2.28 - Unité de convoyage inter-postes - MITI -**

En 2000, le concept de micro-usine a fortement progressé grâce aux travaux collaboratifs d'un consortium d'industriels japonais initié et appelé DTF - pour DeskTop Factory [\[DTF\]](#) -. Des modules standardisés assurent chacun une tâche précise - fabrication, assemblage - et sont aptes à gérer individuellement leur mini-environnement propre. La production se fait en ligne pour une gamme plutôt orientée vers les micro-produits.

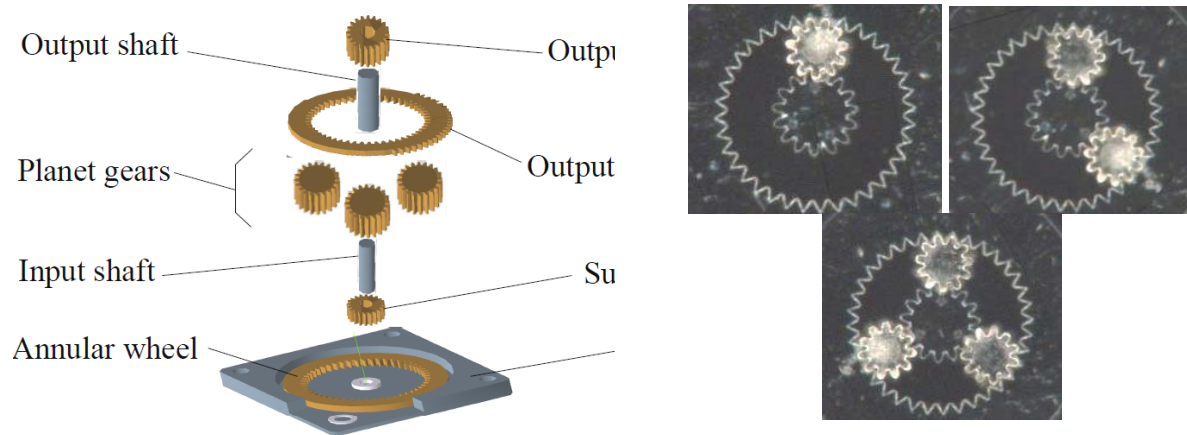


**2.29 - Vue de la mini-usine du consortium japonais DeskTopFactory [\[DTF\]](#)**

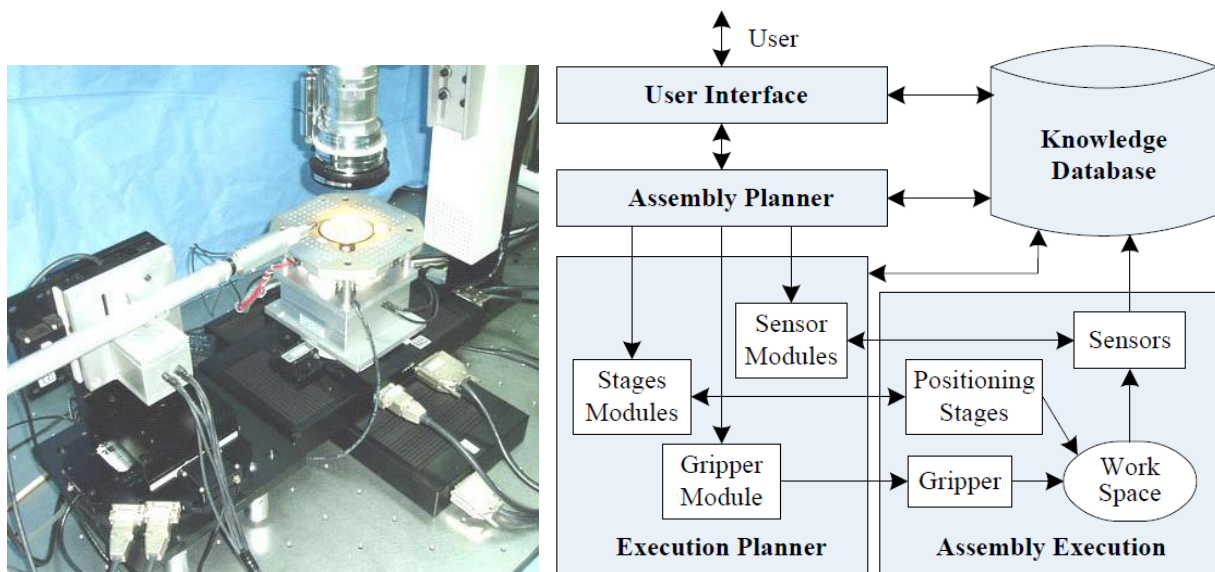
## 2.4 Contexte d'automatisation

Actuellement, pour le prototypage, la télé-opération est très utilisée dans le micromonde à partir de « Stations » équipées d'une interface homme-machine évoluée et permettant à l'opérateur l'accès à un maximum d'information ; l'ergonomie est travaillée mais réservée à des spécialistes. De tels équipements nécessitent qu'un opérateur supervise les manipulations mais ne sont pas adaptés à la mise en production de grandes séries. Pour ces raisons, nous avons transposé au micromonde la notion de « cellule de production » usuellement mise en œuvre à l'échelle méso. Une **cellule** transforme, traite le microcomposant et lui ajoute de la valeur, mais surtout la notion de cellule au sein du micromonde permet à terme une **assistance semi-automatique**, voire **intégralement automatique**. Cette assistance à l'opérateur doit rendre possible la réutilisation d'anciennes méthodes, leurs évolutions, puis l'élaboration de nouvelles méthodes. Pour cela il faut que la notion de cellule consacre une part importante à l'intelligence et à la gestion de sa base de connaissances, véritable archivage actif des savoir-faire micro dans le but d'enrichir les compétences d'ordonnancement.

La Chine est également présente sur le secteur de l'assemblage automatisé de micro-composants. En 2005 [[Sun05](#), [Xie05](#)], l'Institut de Robotique de Harbin démontre la faisabilité de l'assemblage automatisé d'un micro-train d'engrenages épicycloïdal dont les diamètres des roues et pignons dentés sont compris entre 400  $\mu\text{m}$  et 2000  $\mu\text{m}$ . Pour ce faire, la cellule de production utilise un système de positionnement d'approche à six degrés de liberté en cascade avec un second système de précision à cinq degrés de liberté, enfin une micropince piézoélectrique permet la saisie des microcomposants. Par ailleurs, le retour d'information s'obtient grâce à deux microscopes, une caméra CCD et un capteur mesurant l'effort de manipulation.



**2.30 – Engrenage microscopique à train épicycloïdal plan, Harbin - Chine [Xie05]**



**2.31 - Vue de la cellule de Harbin, Chine et son principe d'architecture de pilotage [Sun05]**

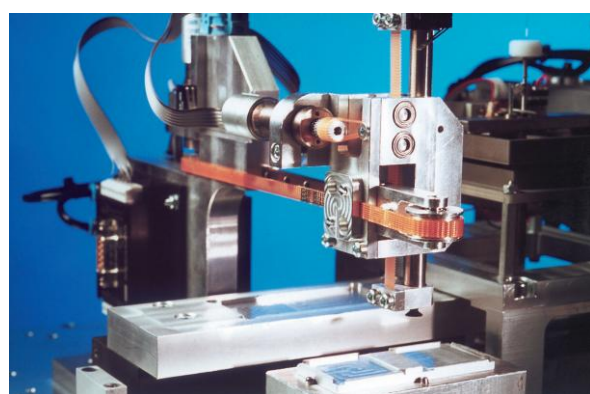
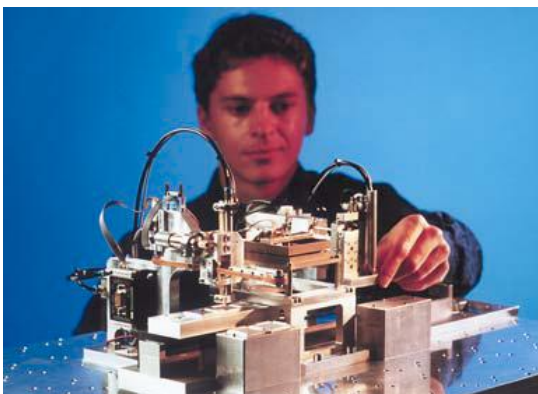
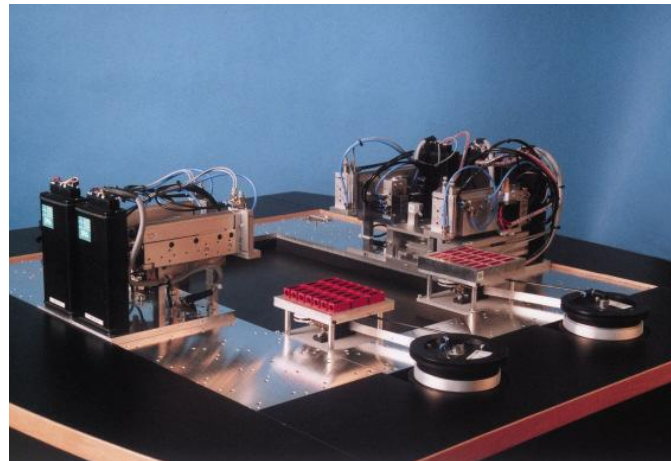
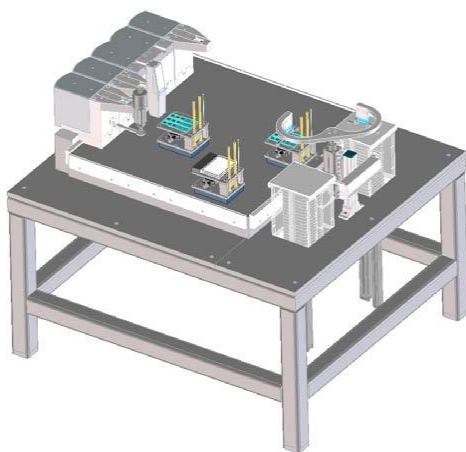
Une description sommaire de l'architecture du logiciel de pilotage fait apparaître trois modules principaux - IHM, planification des tâches d'assemblage, et planification de l'exécution de l'assemblage -. Il est intéressant d'observer la présence d'une base de données des connaissances en phase avec notre description conceptuelle initiale [Des04].

Après ce tour d'horizon asiatique, les avancées réalisées en Europe sont également remarquables :

En Allemagne, [GauT01, GauT03, GauT04] le Fraunhofer Institute IPA collabore avec LAT, Suhl AG, Festo, Z-Laser, CONGEN Biotechnologie GmbH au sein du projet « MiniProd » (Fig. 2.32) et propose une ébauche de micro-usine flexible - par une modularité sur un support - et reconfigurable, appelée AMMS, pour Advanced

Modular Micro-Production System. Elle se compose d'une table plate-forme standardisée sur laquelle des stations d'assemblage peuvent être implantées. Chaque connexion permet l'alimentation en énergie - électrique, azote, air comprimé ou vide -. Un système de convoyage à deux degrés de liberté assure le transfert entre les stations. La précision de positionnement atteinte est de 20 µm.

Une interface informatisée permet de concevoir virtuellement cette chaîne d'assemblage et de la tester avant sa réalisation. La commande est composée d'un contrôleur par station relié en réseau avec ses congénères et supervisé par un ordinateur principal. En 2007, les travaux se poursuivent sur l'AMMS avec une proposition de modélisation objet des systèmes reconfigurables [Ben07].



**2.32 - Vues du projet allemand « MiniProd - Advanced Modular Micro-Production System »**

En Suisse, le CSEM - Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique - et le Laboratoire de Systèmes Robotiques de l'EPFL collaborent pour concevoir une micro-usine modulaire appelée « Pocket Factory » [Ver06].

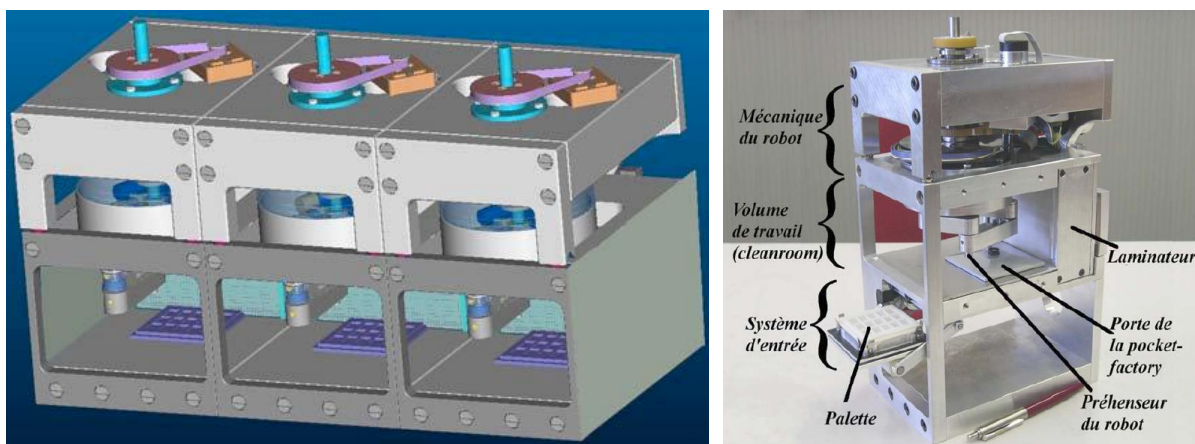
La principale spécificité des modules concerne l'implantation locale d'un « mini-environnement » avec un système de filtration et homogénéisation de l'air qui le



diffuse alors sous un flux laminaire et en fait une « mini-salle-blanche » couvrant directement le volume de travail.

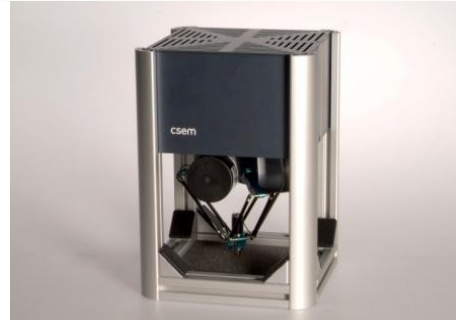
Un tel module est appelé « microbox ». En plus du traitement de l'air, chaque microbox dispose d'un sas d'entrée-sortie des palettes d'alimentation en microcomposants, d'un robot manipulateur, d'une machine spécialisée - pour sertir, coller, souder, laver, etc - et d'un système de vision.

Notons que le sas a été développé pour ne pas introduire de contaminants, et le robot manipulateur permet le transfert des microcomposants entre la palette et la machine spécialisée.

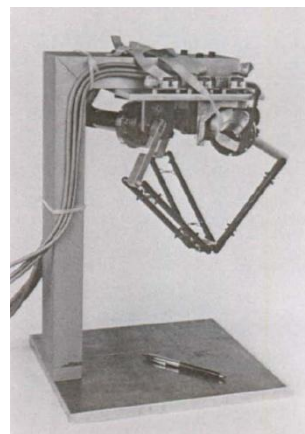


**2.33 - Vues des projets suisses de "Microbox" et "Pocket Factory"**

En Suisse toujours, le CSEM a développé un robot parallèle miniature appelé « Pocket Delta » dont les dimensions –  $12 \times 12 \times 24 \text{ cm}^3$  - et la précision -  $5 \mu\text{m}$  de répétabilité - permettent son usage dans un contexte de micro-usine flexible [Glo07] (Fig. 2.34). « A tout seigneur, tout honneur », nous ne pouvons omettre d'indiquer que ces travaux succèdent à ceux du Pr. Clavel [Cla91] (Fig. 2.35).



2.34 - Vue du microrobot suisse "Pocket Delta" et exemples d'implantation

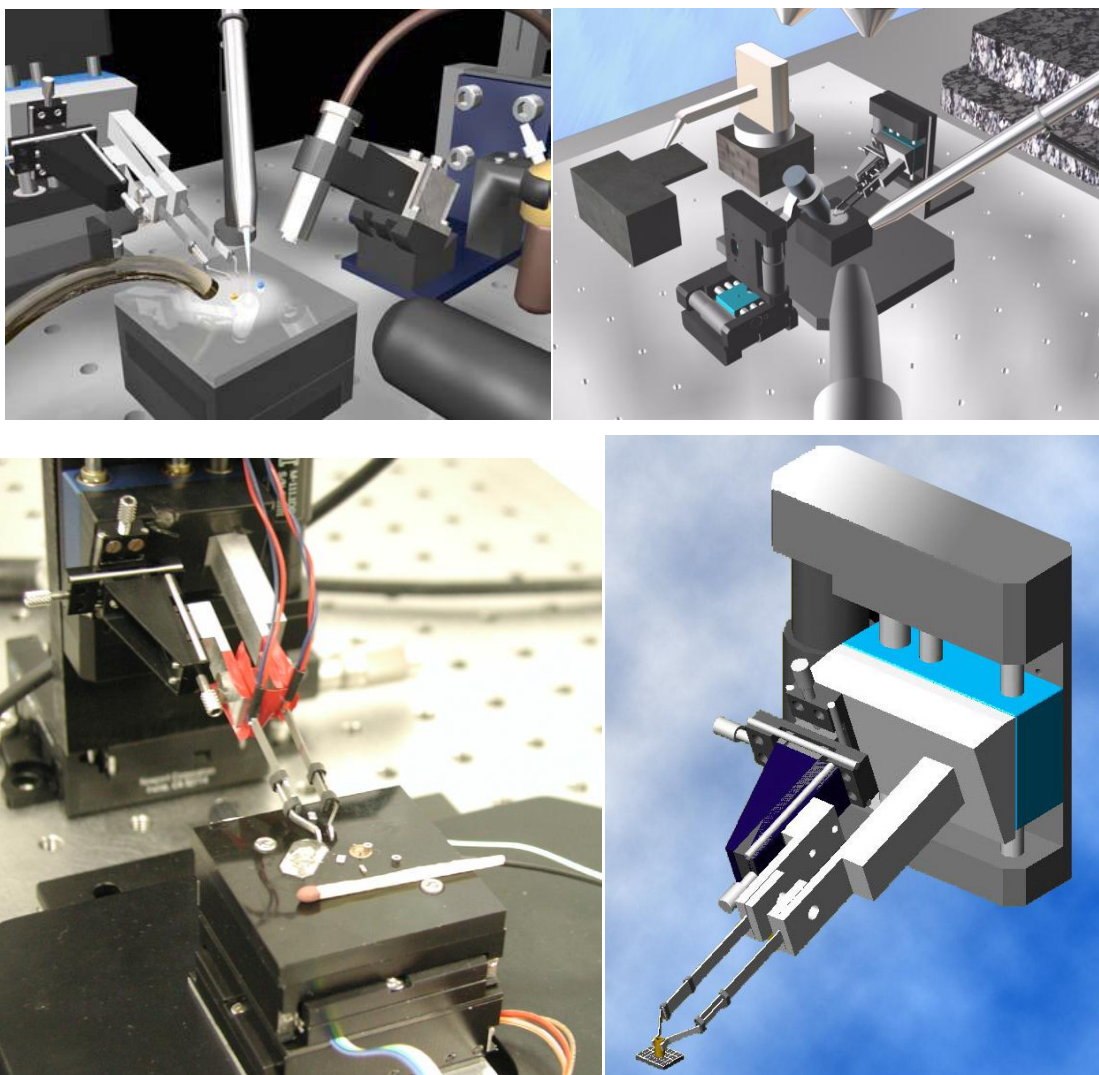


2.35 - Vue d'un robot parallèle delta du Pr. Clavel - EPFL -

En Finlande, les travaux de recherche sont également axés sur le contrôle de l'environnement des stations de micromanipulation [Cor02, Zho01]. Ce sont les paramètres de température et d'humidité qui sont observés et maîtrisés (Fig. 2.36 et 2.37).



2.36 - Vue d'ensemble de la plateforme finlandaise de micro-assemblage et son environnement contrôlé en température et humidité



2.37 - Vues simulées et réelles de la plate-forme finlandaise de micro-assemblage [Zho01]



A l'université de Tampere, le projet appelé TOMI - Towards Mini and Micro Assembly Factories - est mené afin de parvenir à l'assemblage d'un réducteur à engrenages.



**2.38 - Vue du projet finlandais « TOMI » - Towards Mini and Micro Assembly Factories -**

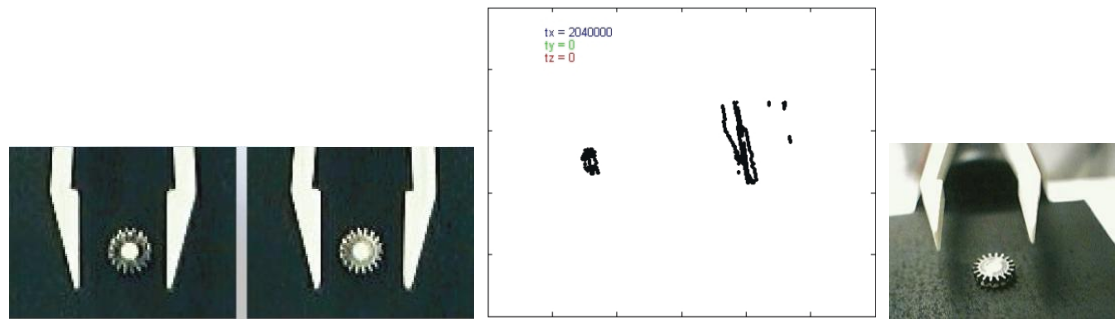
Nous pouvons également témoigner de l'importante présence d'activité de production scientifique dans le domaine du micro en France.

A l'Institut Femto-st, le département AS2M implanté à Besançon, au sein duquel ont été menés les travaux ici présentés, a entrepris un travail de fond sur cette thématique. Le domaine de la vision a été exploré avec des travaux de « transfert trifocal » : reconstruction d'une vue virtuelle d'une scène de micro-manipulation (Fig. 2.39 et 2.40), permettant ainsi l'accès à un point de vue jusqu'alors impossible à obtenir dans la réalité compte-tenu de l'étroitesse de l'environnement de travail en regard des objectifs et zooms optiques à utiliser [\[BerJ07\]](#).



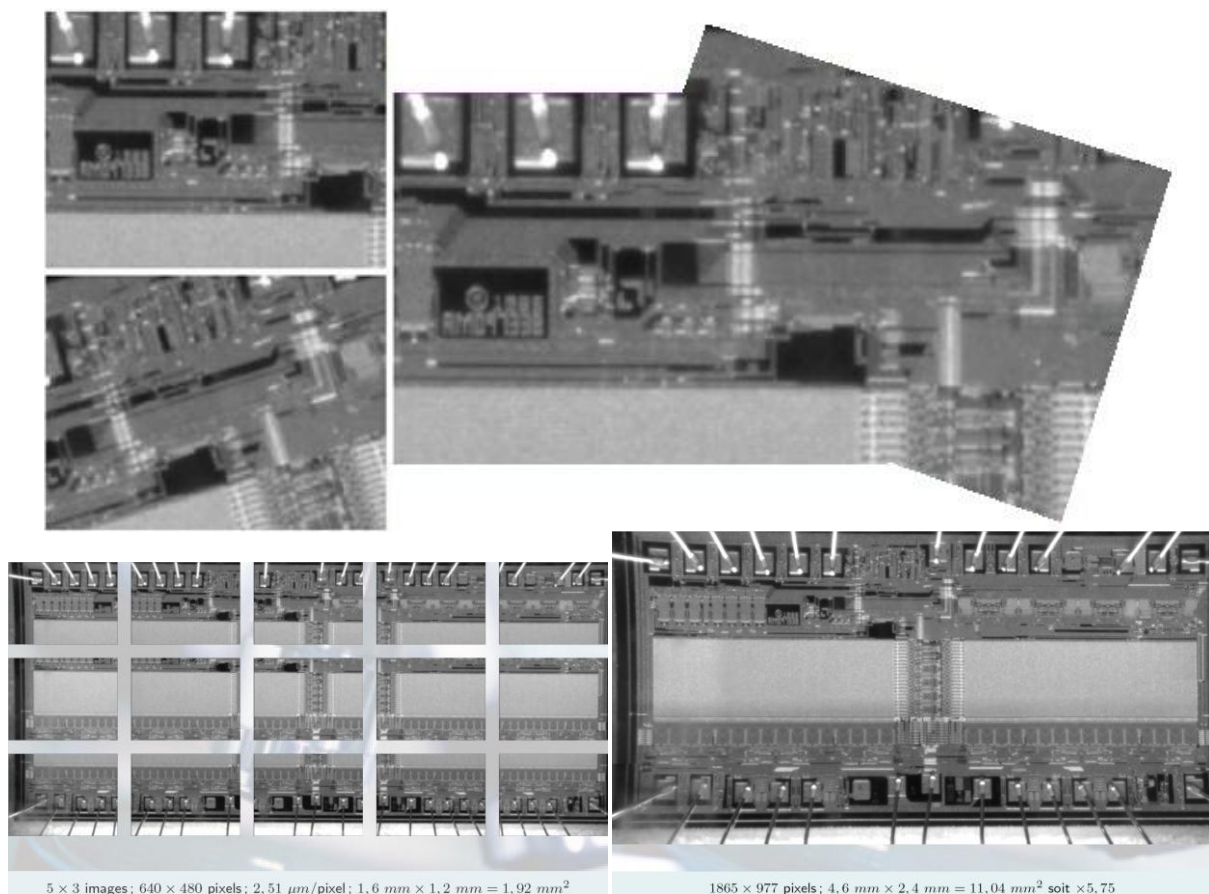
**2.39 - Principe d'une construction de vue virtuelle par transfert trifocal**



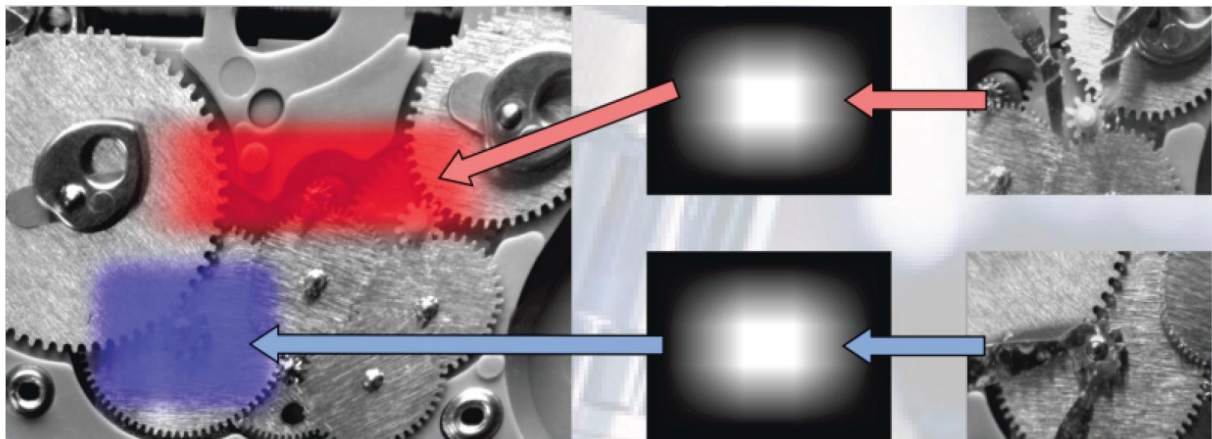


**2.40 - Exemple d'application du transfert trifocal à la micro-manipulation**

Afin d'élargir le champ visuel de l'opérateur tout en gardant une résolution suffisante de la zone de travail, des travaux ont également été menés sur la « construction de mosaïques » (Fig. 2.41 et 2.42). Nous pouvons déjà observer l'importance des données vidéo (et/ou photo) dont les flux seront à gérer et les traitements automatiques à assurer par le système d'information. La complexité n'est pas particulièrement dans le stockage car les actuelles bases de données savent prendre en charge de gros volumes, mais dans les débits élevés d'information qui impliquent des technologies particulières. Récemment, Intel a présenté le Light Peak [\[Int\]](#) : une technologie de transfert de données utilisant la fibre optique et offrant des débits théoriques de 10 à 100 Gbit/s.

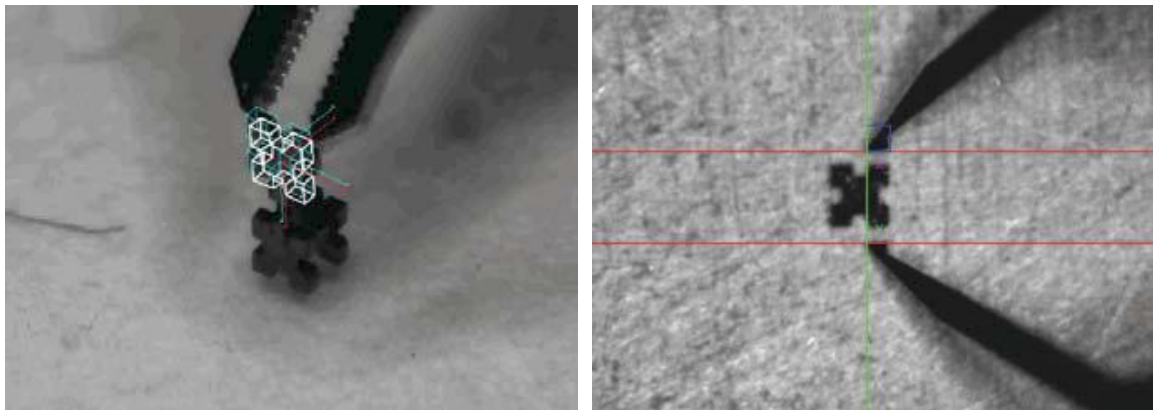


**2.41 - Exemples de construction d'une grande image par mosaïques**



**2.42 - Exemple d'application d'une construction dynamique de mosaïque à la micromanipulation**

D'importants progrès ont été réalisés pour la calibration (Fig. 2.43) en vue d'asservir visuellement la micromanipulation et le micro-assemblage spatial de microcomposants de dimensions  $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$  et permettre leur mise en œuvre automatique [Tam08a, Tam08b, Tam09a]. Ces avancées technologiques nous servent de base d'étude pour la dernière partie de notre travail.

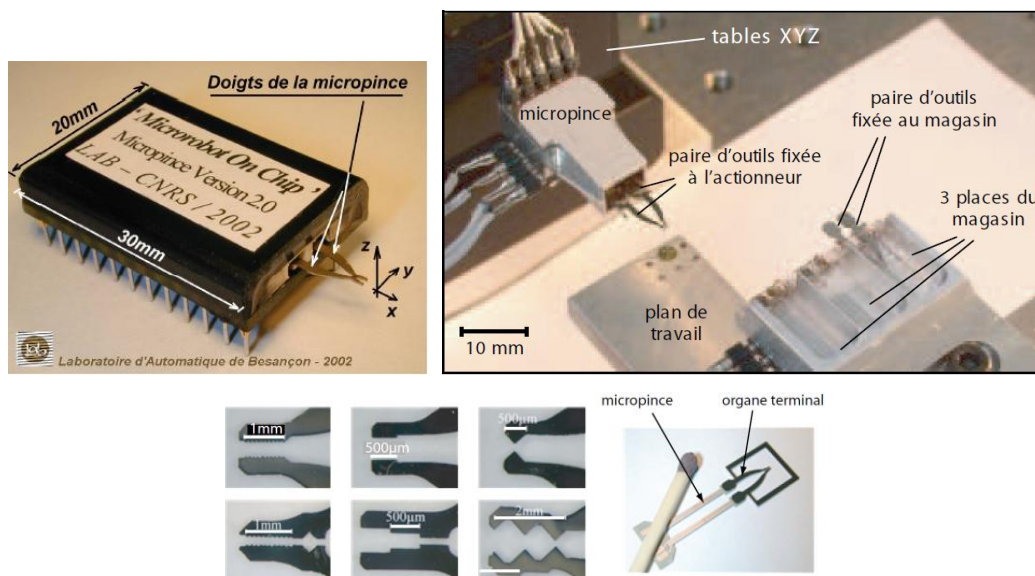


**2.43 - Calibration visuelle et micromanipulation automatique asservie visuellement**

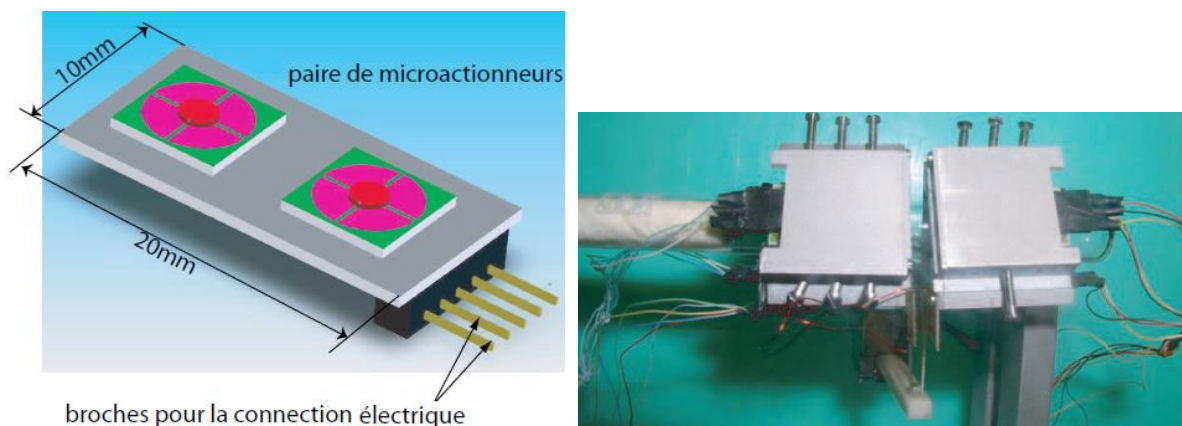
De multiples développements relatifs à l'actionnement ont également été menés ces dernières années au département AS2M à travers par exemple :

- une micropince - MMOC - à organes terminaux interchangeables [Clé05, Agn03] (Fig. 2.44),
- un « TRING module » : actionneur à deux mobilités, de type liaison pivot glissant contrôlée à partir de micro-actionnements piézoélectriques stick-slip [Bre98, Rak06] (Fig. 2.45),

- la conception et commande de systèmes mécatroniques en treillis flexibles à actionnement piézoélectrique intégré [Gro09] (Fig. 2.46 ),
- l'étude de la commande des Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques [GauJY07] (Fig. 2.47),
- un système piézoélectrique d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision [Par08] (Fig. 2.48),
- la faisabilité et la réalisation d'un micropréhenseur à glace immergé [LoW08] (Fig. 2.49),
- une plateforme de mesure de micro et nano forces par flottaison magnétique [Che09] (Fig. 2.50).

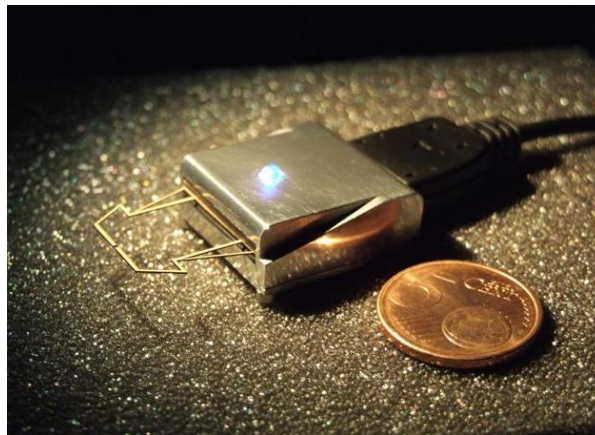


2.44 - Vues de la micropince "MMOC" [Clé05, Agn03] et ses organes terminaux "SiFit" [Agn09]

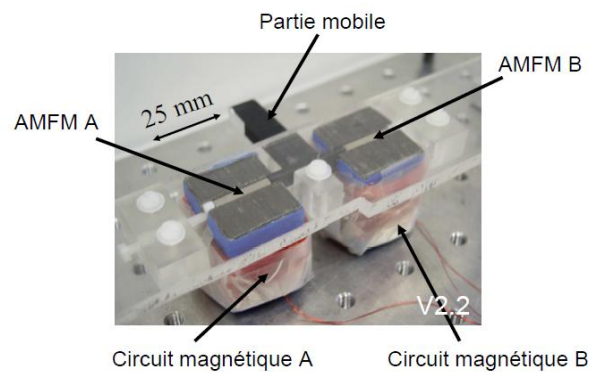


2.45 - Vue d'actionneurs piezo [Bre98] et leur mise en oeuvre dans le "tring module" [Rak06]

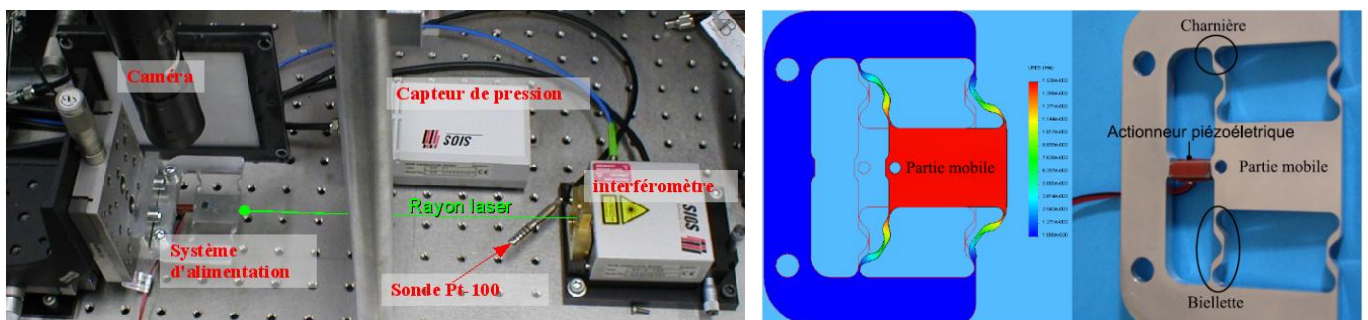




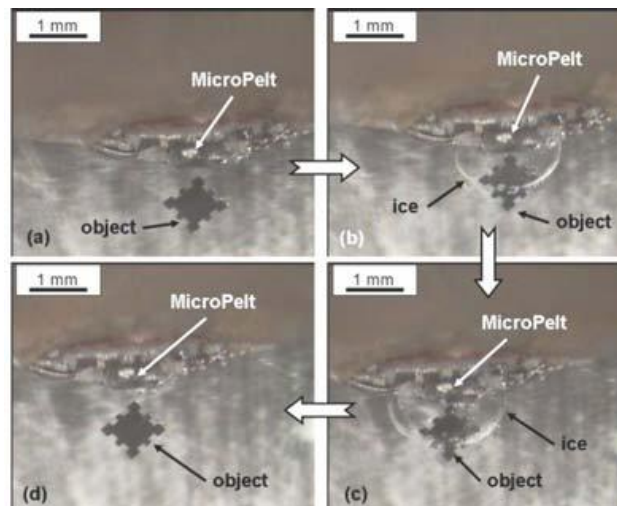
2.46 - Vue d'une micro-pince piezo à capteurs intégrés [Gro09]



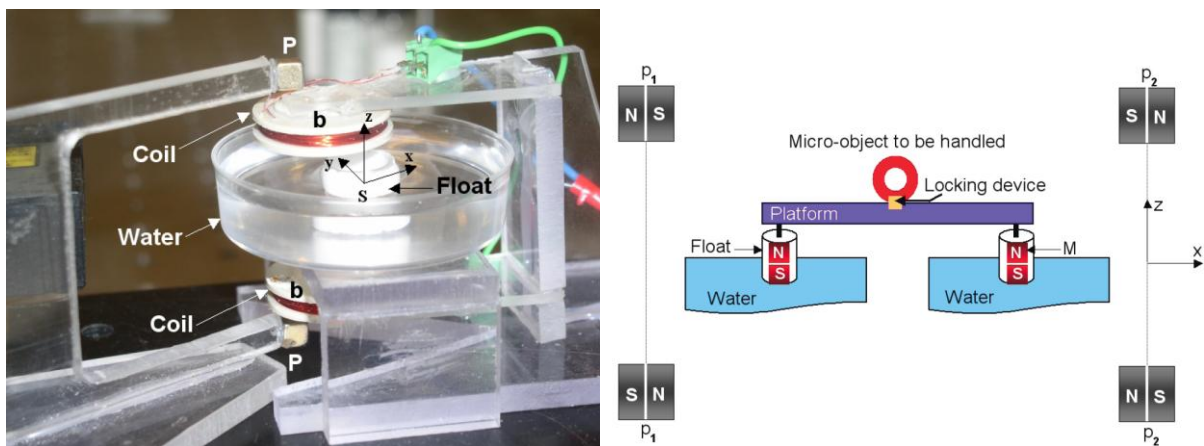
2.47 - Vue d'un microactionneur à AMFM - Alliage à Mémoire de Forme Magnétique - [GauJY07]



2.48 - Vue d'un mécanisme flexible et piézoélectrique de convoyage [Par08]

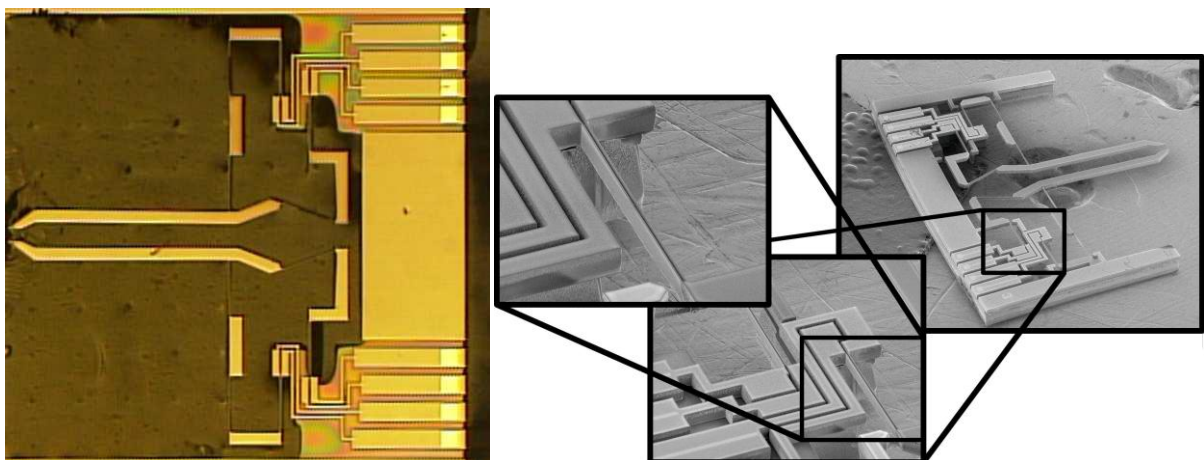


2.49 - Vue d'un micro-gripper à glace [LoW08]



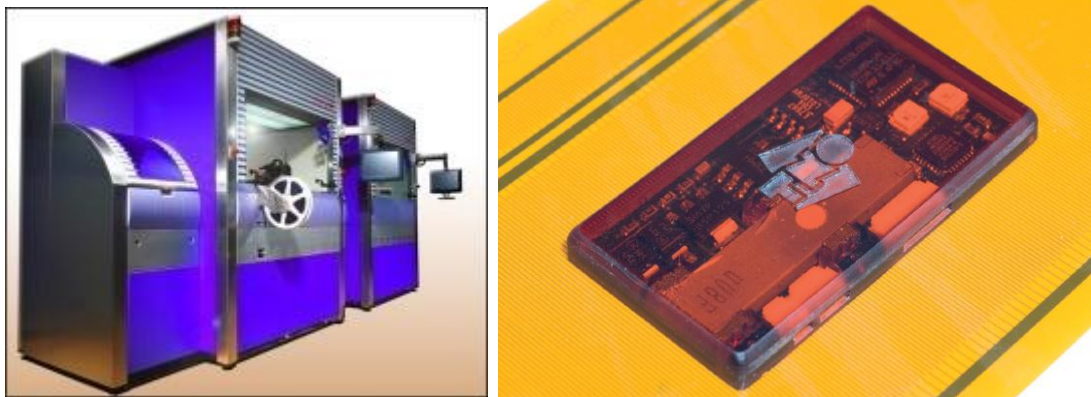
2.50 - Vue d'un capteur de force à flottaison magnétique [Che09].

Une collaboration Américano-Suisse a permis en 2005 la publication d'une micropince dont chaque doigt est sur un mécanisme flexible, à cinq barres, bi-actionné thermiquement par micro-bi-lames (Fig 2.51).



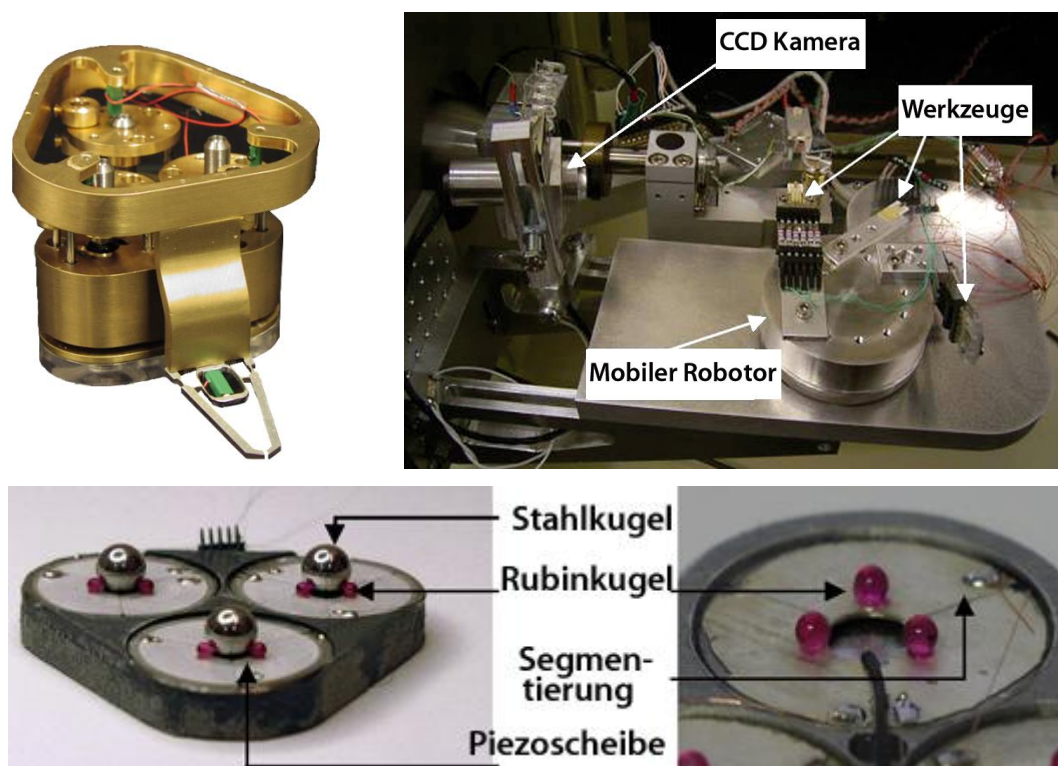
2.51 - Exemple de micropince à 4 ddl, par mécanisme 5 barres bi-actionné, publication USA-Suisse - B.Nelson - [Gre05]

Au Pays-Bas, la machine MA3MST de TNO (Fig. 2.52) avait pour finalité de localiser, pour chaque module de fabrication, un environnement de type salle blanche - classe 100 - puis de stocker le microproduit dans une capsule hermétique garantissant l'absence de contamination. Cependant, le volume et la masse de chaque « module » ne sont pas vraiment en phase avec notre approche et nos travaux.



**2.52 - Vue du projet hollandais MA3MST de TNO à environnement localement contrôlé et sa capsule hermétique**

Un des précurseurs dans l'appropriation industrielle du micro-mode est Sergej Fatikow qui a prospecté à travers de nombreux travaux au cours de la décennie 1990 ; en 2000, il a publié un ouvrage de synthèse sur les micro-robots et le micro-assemblage de l'époque [Fat00] (Fig. 2.53).

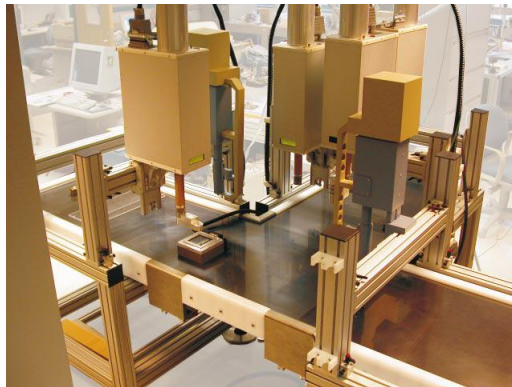


**2.53 – Aperçu des travaux actuels du Pr Fatikow**



Enfin, outre-Atlantique, les USA sont également présents sur le créneau des micro-technologies.

Des travaux entrepris depuis 1996 ont permis à une équipe de l'Université de Carnegie Mellon la mise en œuvre d'une architecture de mini-usine appelée AAA pour « Agile Assembly Architecture » [Hol06] (Fig. 2.54). Ces recherches ont abouti à l'obtention d'un système de « Pick and Place » assisté par vision.



**2.54 - Projet américain de mini-usine de "pick and place" assisté par vision, issu du projet "Agile Assembly Architecture"**

L'Université d'Arlington au Texas ajoute, elle aussi, une pierre à l'édifice micro à travers le projet  $\mu 3$  de construction d'une micro-usine d'assemblage de MOEMS et MEMS (Fig. 2.55 et 2.61).



**2.55 - Projet américain de micro-usine " $\mu 3$  Microfactory Cleanroom " à ARRI Texas**

## 2.5 Vers un microsysteme de production automatisée

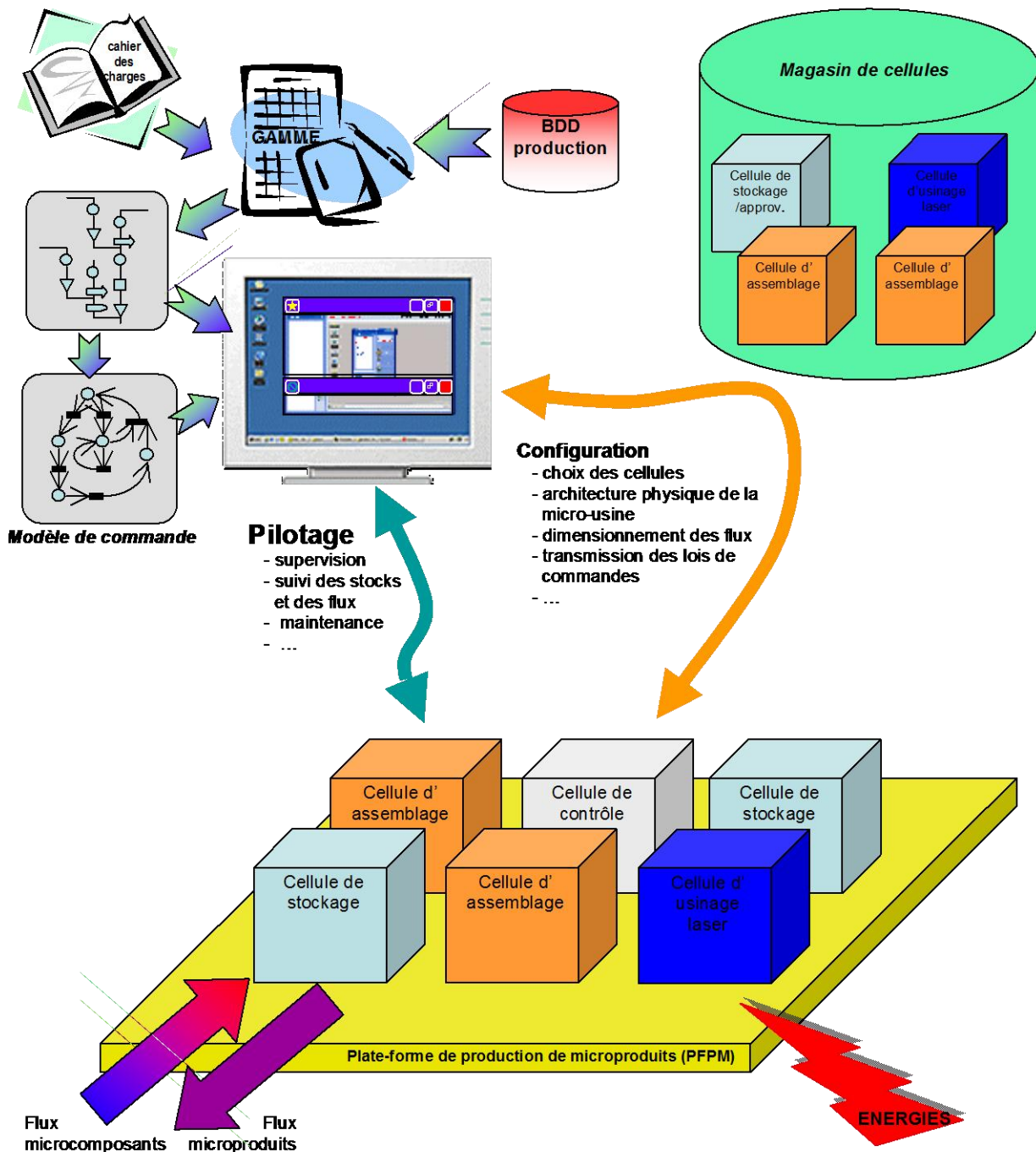
### - Synthèse -

L'automatisation du système de production flexible dédié au micromonde a conduit au concept de « micro-usine » (Fig. 2.56, 2.57). L'état de l'art dans l'environnement scientifique de nos travaux est conséquent, il se justifie par la situation centrale de notre intervention. Le concept de micro-usine tel que nous le concevons se trouve à la convergence de toutes les technologies de terrain résultant des travaux de recherche des deux dernières décennies. Le recensement des multiples avancées technologiques et des récentes connaissances fondamentales nous amène à promouvoir une micro-usine possédant les propriétés suivantes :

- **Reconfigurabilité**, pour permettre l'évolution en cours de production d'une série de microproduit, [[Has03](#), [Kor99](#), [Meh00](#)]
- **Réorganisabilité**, pour permettre un changement de microproduit au sein d'une même micro-usine,
- **Evolutivité**, pour accueillir de nouvelles technologies - implique une certaine modularité ainsi qu'une pérennité du concept -,
- **Acquisition de connaissances**, pour enrichir les bases de données et assurer une efficacité croissante,
- **Génération de nouveaux savoir-faire**, pour répondre à de nouveaux besoins techniques en étant force de proposition,
- **Productivité**, pour une optimisation temporelle et financière,
- **Qualité**, pour assurer une traçabilité des micro-produits et des opérations subies,
- **Flexibilité**, pour produire en petites à moyennes quantités.

A chacune de ces propriétés et pour chaque constituant de la micro-usine, des critères d'évaluation du concept sont établis [§ 3.5].

La micro-usine doit gérer des flux matériels - de microcomposants, micro-sous-assemblages, et microproduits -, des flux d'informations et d'indispensables flux d'énergie... aussi infimes soient-ils, à terme.



## 2.56 - Présentation de la structure du concept de micro-usine

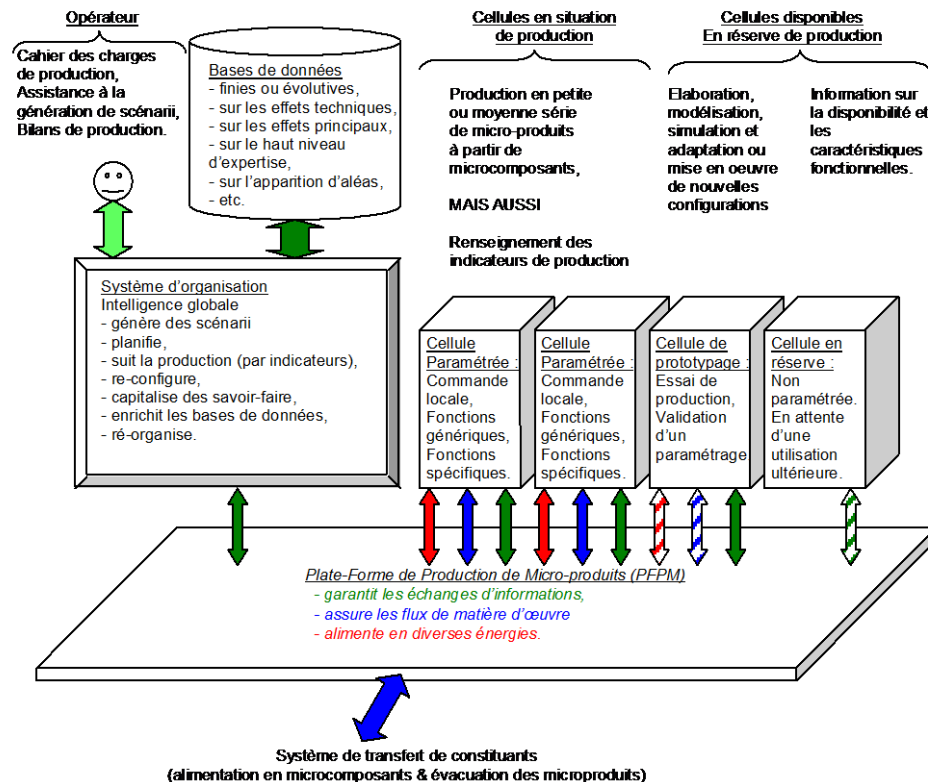
Les informations échangées concernent des mesures, des connaissances, des décisions et des ordres. Les connaissances en entrée de l'organe décisionnel proviennent de mesures et de multiples savoir-faire. Les mesures sont issues de capteurs et microcapteurs implantés au cœur des cellules de production. Les ordres sont à destination des micro-actionneurs lesquels sont constitués d'éléments actifs au sein des cellules.

Les décisions sont, quant à elles, prises par l'opérateur secondé par un organe décisionnel que l'on appelle le « système d'organisation ».

Les cellules, qu'elles soient en phase d'expérimentation ou de production, sont accueillies par une « plate-forme de production de micro-produit » - cette dernière est nommée PFPM pour simplifier la lecture -. La PFPM remplit de multiples fonctionnalités.

En premier lieu, elle permet le positionnement relatif des cellules, qui consiste à mettre et à maintenir en position grâce à une interface mécanique à standardiser. Bien qu'a priori fixes dans le temps, ces positionnements relatifs peuvent être amenés à évoluer de sorte à observer une certaine migration des cellules durant la phase d'ajustement du scénario de production – ordonnancement technique -, ceci pour respecter les propriétés de réorganisabilité voire de reconfigurabilité. En évolution à la traditionnelle représentation linéaire d'une ligne de production du mésomonde, la PFPM est à même d'accueillir une répartition surfacique ou même volumique des cellules. L'implantation surfacique peut s'appuyer sur une structure plane ou sur des structures à la géométrie plus complexe ; sphérique, conique, cylindrique, tétraédrique, cubique, etc. Il en va de même pour des implantations éventuellement volumiques au sein d'un parallélépipède, d'une sphère, d'un cylindre, d'une pyramide, d'un cône, etc. La technologie des circuits souples permet dorénavant d'envisager de telles implantations [\[Par\]](#).

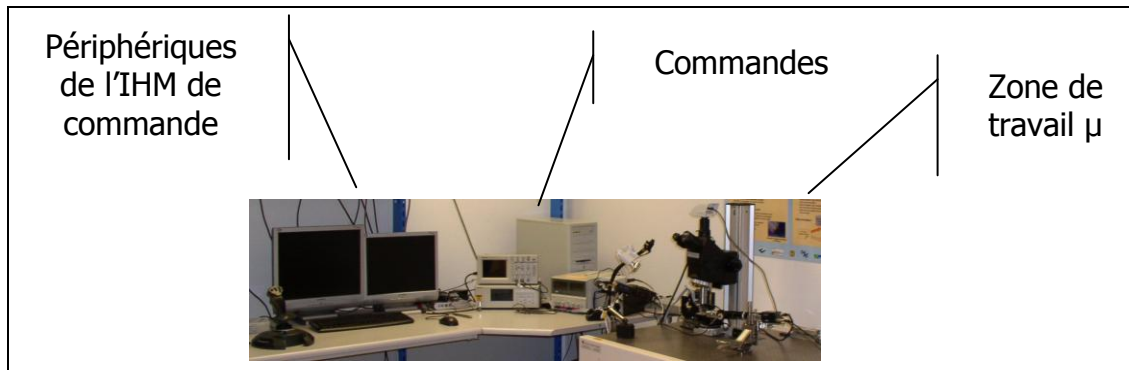
Ensuite, la PFPM permet la mise en place de trois types de liaisons entre les divers acteurs de la micro-usine. Premièrement, elle gère les flux de microcomposants : leurs transferts inter-cellules, l'approvisionnement en matière première et l'« expédition » des microproduits fabriqués. Deuxièmement, elle permet l'alimentation énergétique des cellules parce que toute intervention de manipulation ou d'assemblage, même micro, requiert un certain travail. Troisièmement, la PFPM supporte les échanges d'informations en provenance et à destination des cellules.



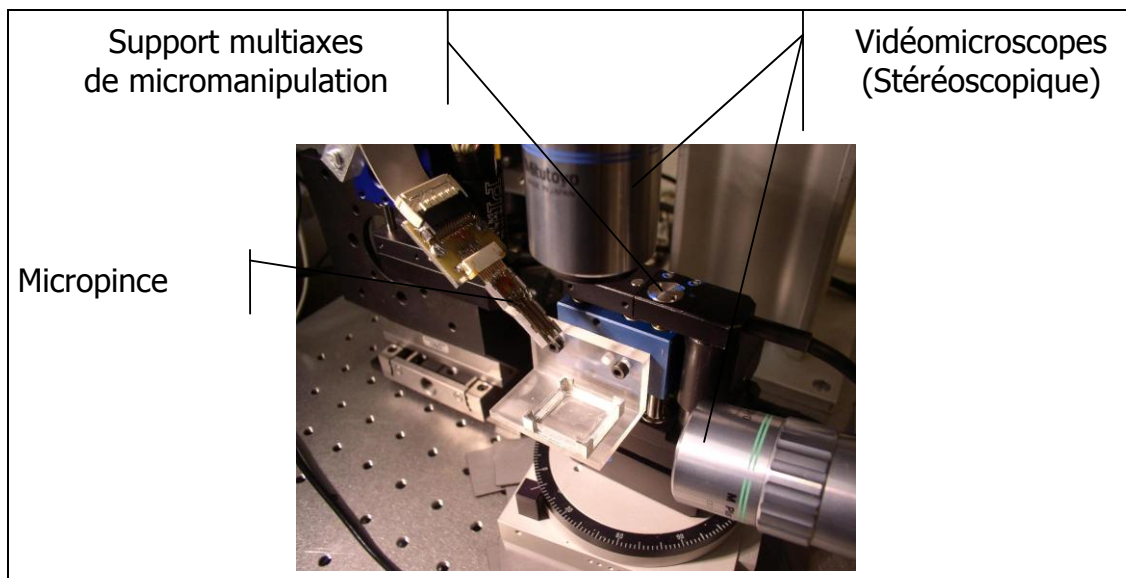
2.57 - Proposition de description des constituants d'une micro-usine

La flexibilité spécifique d'un tel concept lui assure une pérennité temporelle qui n'est possible qu'avec un certain niveau d'intelligence. Ce dernier est nécessaire à un pilotage évolutif et à une bonne conduite de l'ensemble des systèmes de production. Cet ensemble sera constitué de la future flotte de micro-usines puisque nous comptons sur une collaboration de toutes les micro-usines lorsqu'elles seront en service.

Mais dans un premier temps, ces micro systèmes de production se doivent d'être téléopérés et requièrent une IHM adaptée. Nous voyons sur les figures suivantes (Fig. 2.58, 2.59, 2.60, 2.61) à quoi ressemblent actuellement de telles interfaces et cet aspect sera détaillé dans la suite du document [§ 3.4.3].



2.58 - Vue d'ensemble de la station de téléopération du projet PRONOMIA



2.59 - Détail de la zone de travail de la station du projet PRONOMIA



2.60 - Vue d'artiste du concept de micro-usine télé-opérée [Oga98]





**2.61 – Micro-usine “ $\mu 3$ ” de micro-assemblage, à ARRI’s Texas [[Pop09](#)] et son IHM haptique**

En réponse à un tel cahier des charges pour ces systèmes de production de microproduits, la modularité matérielle quasi-évidente doit s’accompagner d’un système d’information apte à l’accepter. Nous allons maintenant préciser la problématique de ce système d’information inhérent à la micro-usine.

## 2.6 Problématique du système d'information : (le « besoin »)

Souvent remplacé à l'usage par l'acronyme SI, le Système d'Information regroupe l'organisation d'un ensemble de ressources destinées à l'acquisition, à la structuration, au stockage, à la communication, à l'échange et au contrôle de données au sein d'une entreprise. Cette finalité est généralement obtenue par l'intermédiaire de diverses ressources en matériels, en logiciels et en hommes. Si le SI permet globalement la communication des données dans l'organisation de l'entreprise, il existe dans l'industrie deux catégories de Systèmes d'Information : le SI support de la gestion, et le SI support des opérations de production. C'est, dans un premier temps, cette seconde catégorie qui nous intéresse pour la micro-usine. Ce système d'information dédié au support des opérations de la micro-usine est, par ailleurs, l'unique porte d'accès au micromonde pour l'opérateur, que ce soit pour y agir ou pour effectuer des mesures.

Les échanges d'informations au cœur des cellules se font au minimum entre et avec les capteurs et actionneurs, et en cas de décentralisation d'une commande au sein des cellules, avec cette commande localement déportée.

Classiquement, une machine spéciale ou une ligne de production comporte un système de commande principal, central, souvent regroupé dans l'appellation « partie commande ». Mais pour un système complexe, ayant recours à de nombreux organes nécessitant un pilotage fin, généralement numérique, tels les bras articulés de robots industriels, il est choisi de déporter localement une partie commande spécifique à cet ensemble multi-actionneurs, à travers sa propre armoire de contrôle. D'une manière générale, la commande peut potentiellement être distribuée localement, tout en disposant d'un système central de supervision. Dans une telle configuration, la commande est dite « mixte » puisqu'elle s'appuie à la fois sur une distribution hétérarchique locale et sur une structure hiérarchique centrale.

Ainsi, nous pouvons nous interroger sur l'architecture la mieux adaptée au contexte de micro-usine modulaire.

En effet, au-delà d'un objectif basique d'automatisation de la production, les spécificités de notre concept de micro systèmes de production sont fixées par les caractères évolutif et intelligent, mais aussi collaboratif, qui assurent une pérennité du concept. Il est nécessaire de disposer d'une capitalisation de connaissances qu'il

faut être en mesure de fournir lors des campagnes d'expérimentations prospectives et qu'il faut ensuite mettre à contribution pour décider des campagnes suivantes. Cette logique dans l'approche s'apparente à une sorte de rétro-ingénierie appliquée à la production de microproduits, mais aussi à la conception des microproduits elle-même [[Rou04](#)]. A ce titre, il est implicite de disposer d'un accès à la configuration d'une cellule et de pouvoir, si nécessaire, intervenir sur son organisation ou plus généralement sur l'organisation complète de la micro-usine. De tels atouts sont les clefs de la performance du point de vue de la production industrielle de microproduits.

## 2.7 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des microproduits, qu'ils soient MEMS ou MOEMS ou encore des cellules biologiques manipulées. Les efforts surfaciques prépondérants dans le micromonde ainsi que l'influence du facteur d'échelle sont deux paramètres déterminants de la micromanipulation, d'où une tendance à concevoir des microproduits DFμA - Design For Micro Assembly -.

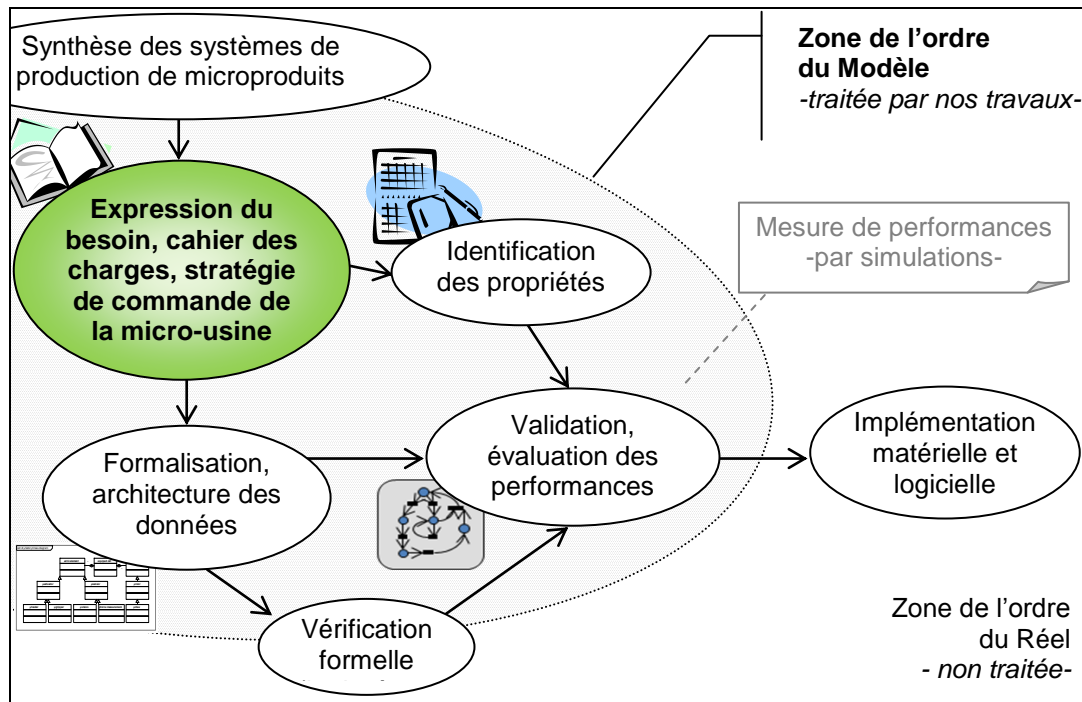
A travers le monde entier, des équipes de scientifiques se penchent sur le problème de la production dédiée à la dimension micrométrique. Pour des raisons d'économies financières et énergétiques, il est indispensable de parvenir à un degré de production automatique, voire, dans un premier temps, de semi-automatisation accompagnée d'une assistance à l'opérateur de plus en plus efficace.

La communauté travaille autant à comprendre le micromonde du point de vue des microcomposants manipulés et assemblés, que du point de vue des stations téléopérées et cellules automatiques équipées d'actionneurs et capteurs indispensables à l'accessibilité de cette échelle.

Face aux productions attendues de microproduits diversifiés, parfois en petites ou moyennes séries, il s'agit de proposer un micro système de production modulaire apte à la reconfiguration et à la réorganisation de sa plate-forme et de ses cellules. Cette micro-usine requiert un système d'information adapté.

### 3. Définition du système d'information de la micro-usine

Le système d'information que nous nous apprêtons à définir occupe une fonction centrale dans la micro-usine. Elément majeur, sa bonne description est indispensable à l'évolution de ce système de production.



3.1 - Méthodologie de travail, étape de définition de la stratégie de commande

Afin de définir la stratégie de commande de la micro-usine dépendante de son système d'information, nous rappellerons, en préambule, le concept de système d'information (§ 3.1), pour ensuite introduire l'outil UML utilisé couramment pour une telle modélisation (§ 3.2). Nous serons dès lors en mesure de caractériser (§ 3.3) le système d'information de la micro-usine, puis de définir son architecture (§ 3.4).

Enfin, nous tâcherons de recenser les critères d'évaluation de la modularité attendue (§ 3.5 et annexe § 6.1) et de brièvement balayer les supports techniques disponibles pour une mise en œuvre pratique (annexe § 6.2).

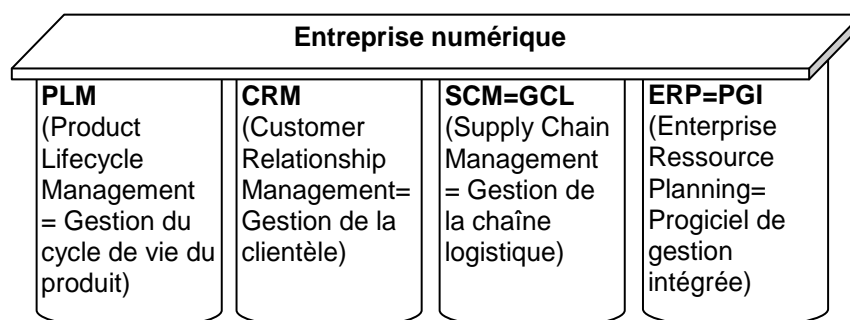
### 3.1 Concepts et état de l'art des systèmes d'information dans les systèmes de production

#### 3.1.1 Le PLM

A grande échelle, dans le monde industriel actuel des systèmes de production de taille méso, toujours plus d'entrepreneurs ont recours à une démarche PLM - acronyme de « Product Lifecycle Management » qui correspond à l'appellation « gestion du cycle de vie du produit » -.

Le PLM est un des quatre piliers de l'« entreprise numérique » qui met en œuvre la stratégie e-business avec :

- le CRM - « Customer Relationship Management » -, pour la collecte des besoins client et l'analyse des marchés et des tendances pour l'innovation continue ;
- la « Gestion de la Chaîne Logistique » - GCL ou SCM pour « Supply Chain Management » -, pour gérer la chaîne logistique et délivrer au client le produit attendu ;
- les ERP - comme SAP -, pour faire communiquer l'ensemble des processus opérationnels de l'entreprise à partir d'une base informatique. - Nous détaillons cet outil dans la suite du paragraphe [§ 3.1.2.3] au niveau de l'état de l'art des systèmes d'informations industriels -.



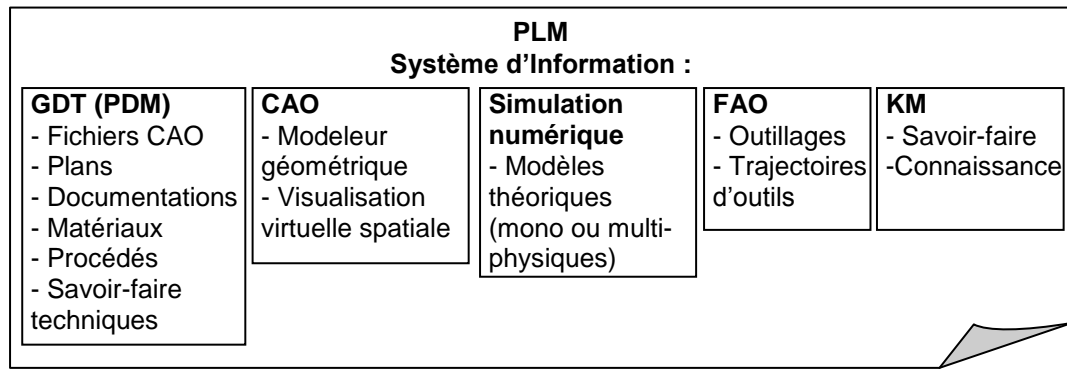
#### 3.2 - Schématisation de l'Entreprise Numérique

Il s'agit d'une stratégie d'entreprise qui consiste à initier, administrer et diffuser l'ensemble des informations relatives à un produit durant l'intégralité de son cycle de vie. Cela concerne le produit manufacturé depuis les pré-études avec la définition, suivies de la fabrication, de la maintenance et jusqu'à son recyclage.



En conséquence, l'organisation d'un PLM s'appuie sur un système d'information qui contient :

- la GDT - « Gestion de Données Techniques », ou PDM pour « Product Data Management » -. Le système de GDT ne s'occupe que de la gestion des informations techniques associées au produit - fichiers CAO, plans, documentation, matériaux, procédés, etc. - lors de la phase de conception. Il contient le savoir-faire technique d'une entreprise ;
- la CAO - « Conception Assistée par Ordinateur » -, utilisant un modelleur géométrique, pour une visualisation virtuelle du produit avant même sa fabrication ;
- la « simulation numérique », s'appuyant sur des modèles théoriques, elle permet d'anticiper au maximum le comportement du produit grâce à la simulation par le calcul, généralement d'un unique phénomène physique. Elle est la source de la prédiction de l'évolution. A l'heure actuelle, l'offre sur le marché de tels logiciels permet des simulations dites multiphysiques, capables de simuler la conséquence de plusieurs phénomènes imbriqués ;
- la FAO - « Fabrication Assistée par Ordinateur » - : un tel outil permet le calcul des trajectoires que devront suivre les outils par rapport aux surfaces qui définissent la pièce finale. Le déplacement relatif peut par ailleurs induire un mouvement absolu de la pièce plutôt que de l'outil. La FAO contient également les outils - groupés dans l'appellation outillage - que requiert la production d'une pièce. Un outil n'intervient pas uniquement pour générer un enlèvement de matière, il peut agir également dans un équipement de mise ou de maintien en position ;
- le KM - « Knowledge Management » ou « Gestion des connaissances » - regroupe des méthodes de travail dont la finalité consiste à détecter, déterminer, étudier, classer, archiver et mettre à disposition l'ensemble des savoir-faire et connaissances de l'entreprise en son sein.



### 3.3 - Schématisation d'un PLM

Le PLM est une démarche qui autorise également la « gestion des processus » de l'entreprise - ou « workflow » - en rapport avec cette documentation. A ce titre, la PLM est souvent développée avec un ERP pour échanger en temps réel des informations entre la conception, la gestion comptable et la fabrication.

### 3.1.2 Le concept de système d'information

#### 3.1.2.1 Généralités

Le concept de « système d'information » - abrégé par SI - s'est très fortement développé avec l'apparition de l'informatique et ses bases de données de capacités quasi infinies [Big06].

Après le stockage vient le traitement de l'information pour en permettre l'extraction de réponses pertinentes face à diverses requêtes utilisant de multiples paramètres sans cesse distincts.

Le traitement est chronophage, il limite la notion de « temps réel » et mérite une optimisation permettant de rendre certaines informations plus pertinentes que d'autres - tel l'usage des phéromones par certains insectes comme les fourmis, les chemins les plus sûrs étant empruntés sans pour autant oublier définitivement d'autres options -.

Historiquement, de tels SI ont été très rapidement exploités par de grosses structures de services telles que les banques ou la SNCF pour l'optimisation de leurs produits. Mais l'univers médical est aussi friand de telles architectures afin d'enrichir et fiabiliser les dossiers et l'historique des patients à travers un « système d'information hospitalier », SIH. Il s'agit aussi, pour les maladies dites orphelines, de rechercher d'improbables relations entre un nombre limité de cas médicaux a priori sans rapports apparents.

Les « systèmes d'information géographique », SIG, révolutionnent les services relatifs à la gestion du patrimoine géographique, tel que le Cadastre. Récemment accessibles au grand public à travers les sites Internet tels que le Geoportail de l'IGN, GoogleEarth, GMap ou encore la série des viamichelin, mappy et autres consorts, les SIG sont encore amenés à fortement progresser et enrichir leur base de données. Par exemple, le Conseil Général du Doubs met à disposition une carte géographique interactive, la RATP offre à ses usagers la possibilité d'optimiser leur itinéraire selon divers critères.

Il existe des « systèmes de gestion de bases de données relationnels » très aboutis tel Oracle d'Oracle Corporation.

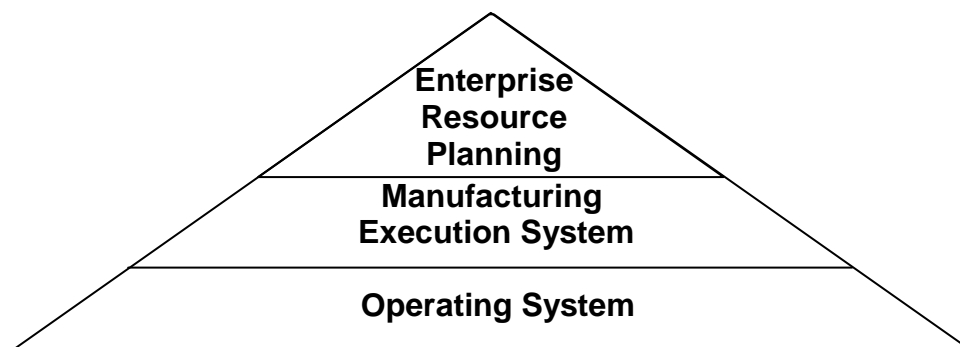
### 3.1.2.2 Système d'information industriel : Le CIM

Dans le domaine industriel qui nous concerne, à savoir dans les systèmes automatisés méso, l'architecture des systèmes d'information s'appuie sur le concept de la « Computer Integrated Manufacturing », CIM, donnant l'accès à une totale automatisation des procédés de fabrication.

L'objectif est de regrouper toutes les informations relatives au fonctionnement d'une usine de production, de la direction au système de production en passant par la gestion commerciale.

La « Gestion de Production Assistée par Ordinateur », GPAO, permet de gérer et suivre les stocks, les achats, l'approvisionnement, les commandes, les Ordres de Fabrication - OF -, les produits, leur expédition et enfin la facturation.

Ces outils permettent une meilleure gestion de la production et des temps correspondants, optimisant ainsi le fonctionnement de l'entreprise.



3.4 - Pyramide du CIM

### 3.1.2.3 L'ERP - PGI -

Au sein d'une entreprise, la gestion de l'ensemble des processus opérationnels est confiée à l'« Enterprise Resource Planning », ERP que l'on peut traduire par la « planification des ressources de l'entreprise » ou d'une manière plus compacte avec l'appellation « Progiciel de Gestion Intégrée », PGI. Un Progiciel est la commercialisation d'une suite de logiciels "ready-to-use", standardisés et génériques, prévus pour répondre à des besoins ordinaires. Dans le cas présent, une telle application permet le contrôle de la comptabilité, de la gestion financière, des ressources humaines, de la vente, des approvisionnements et de la distribution. D'une part, sur les données, un ERP permet la mutualisation d'une unique base de données partagée entre plusieurs applications modulaires dédiées aux divers

services de l'entreprise. Le format standardisé des données permet d'éviter les redondances et d'éventuels doublons fortement perturbateurs. D'autre part, sur les échanges de données, il est important de souligner que l'ERP diffuse et propage les nouvelles données auprès de chaque module du système en fonction de règles pré-établies dans un « moteur de workflow ». Un tel « workflow » est un logiciel paramétrable dédié à la transmission des informations entre les modules.

Dans le secteur de la gestion de l'information, une référence régulière est le SAP de la société allemande « SAP Aktiengesellschaft » pour son produit phare : un progiciel de gestion intégré - ou ERP - appelé justement SAP pour « Systems, Applications and Products for data processing », mais elle rencontre un rival français de taille avec « Business Object ».

La méthode « Material Requirement Planning », MRP, a permis d'informatiser la planification et la gestion de la production ainsi que le contrôle des stocks à partir des nomenclatures et des gammes de fabrication dans le but de manager la production industrielle. Un enrichissement de cette méthode a donné le MRP2, pour « Manufacturing Ressources Planning ». Cette évolution apporte une aptitude à planifier les lancements en fonction de la disponibilité des ressources et de leurs capacités selon les périodes.

Dans une micro-usine, compte-tenu du gigantisme de la taille de l'opérateur en comparaison, ce dernier est physiquement en dehors du système de production. En ce sens et dans une certaine mesure, notre proposition rapproche le concept de la CIM de celui des « usines sans ouvriers » appelées également « lights out factory » car il n'est pas nécessaire d'éclairer une usine démunie de personnel humain.



#### 3.1.2.4 Le MES

Notre besoin initial est de l'ordre du « Manufacturing Execution System », MES. Un tel système informatique a pour objectif principal de collecter en temps réel l'intégralité ou une portion des données de production d'une usine. La collecte de ces données est un préalable à l'exécution de multiples activités d'analyse :

- d'ordonnancement,
- de suivi de production,
- de contrôle de la qualité,
- de traçabilité, généalogie,
- de maintenance curative et préventive - e-maintenance -.

La finalité d'un MES consiste à fournir les informations indispensables au perfectionnement des activités de production, de l'édition de l'OF – Ordre de Fabrication - à la fourniture du produit fini. L'actualisation de l'information, la précision dans les données permettent au MES de coordonner et d'adapter le procédé de fabrication en cours de production tout en élaborant les rapports sur l'activité de l'atelier. L'usage d'un MES augmente l'efficacité de l'usine tout en réduisant le besoin en capacité de stockage.

Les progiciels de MES ont vu leur structure standardisée et normalisée par l'ISA. Un MES correspond à la couche située entre les deux niveaux que sont les systèmes de planification ERP du type SAP, et les automatismes de la production.

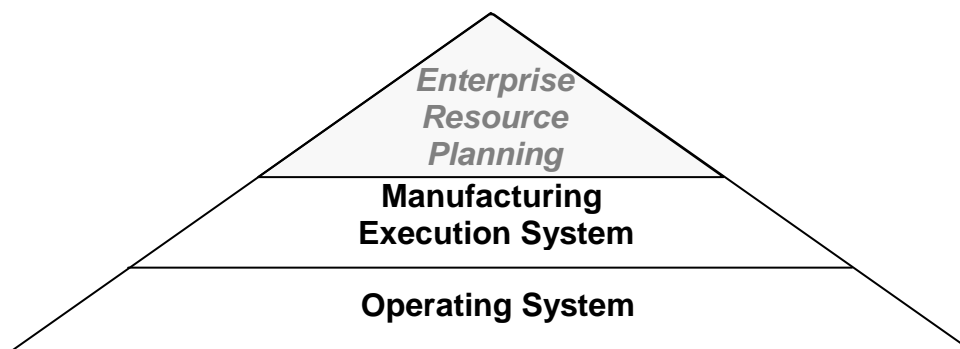
Ainsi le MES permet l'accès bidirectionnel à l'information par la chaîne logistique et également par l'organisation de l'entreprise.

La place occupée par le MES dans les ateliers de production est située entre les deux niveaux fonctionnels :

- du système de supervision qui pilote en temps réel, sur le terrain, les moyens de production - Operating System = Système d'Exploitation - ;
- du programme de GPAO - Gestion de la Production Assistée par Ordinateur -, et de l'ERP.

Le MES prend le rôle de support à la communication dans l'intégration des données informatiques, au sein du concept CIM en décrivant l'automatisation des procédés de fabrication regroupant l'ensemble des supports numériques de la production - automates et ordinateurs en réseau -.

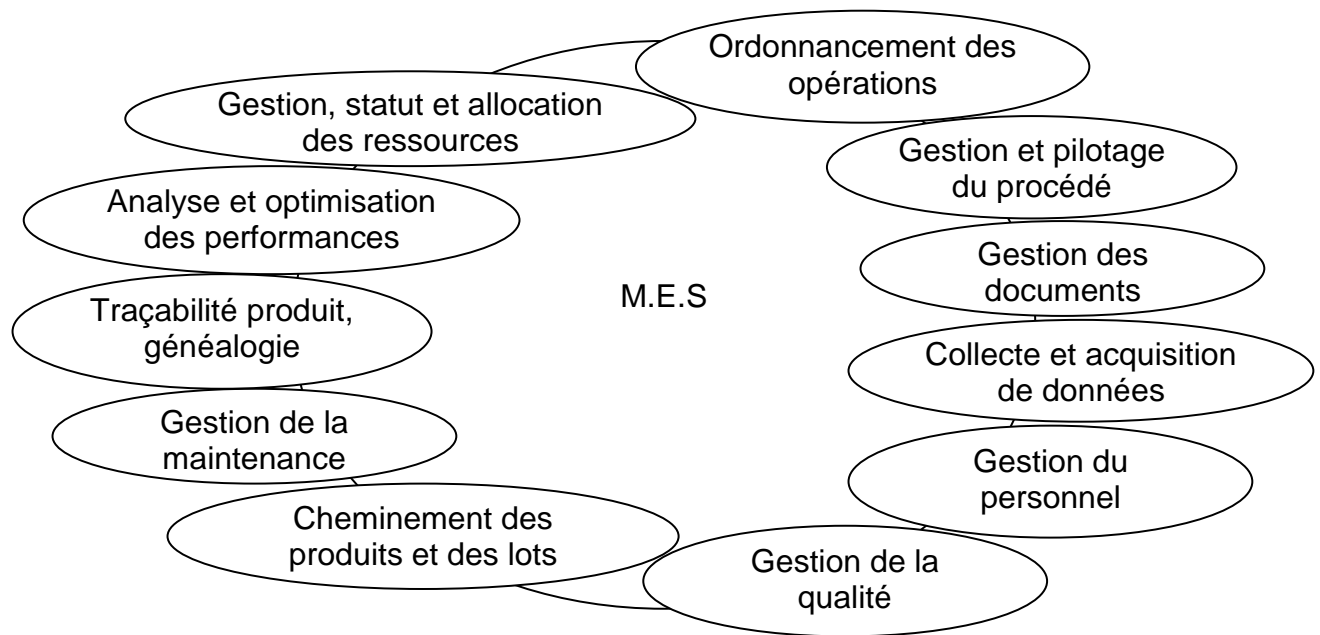
Notre cadre d'intervention s'inscrit principalement au niveau de l'activité MES du système d'information du modèle de décision de la pyramide du CIM (§ 3.5). Ils se ressentent cependant également et en grande partie au niveau « contrôle-commande » puisque c'est à cet endroit que se trouve le micromonde piloté.



### 3.5 - Positionnement de notre étude dans la « pyramide » du modèle CIM

L'apparition de tels progiciels a été encadrée par une norme internationale appelée ANSI/ISA-95. Les deux premières parties de cette dernière, sur un total de cinq, sont à l'origine d'une autre norme internationale, référencée IEC/ISA62264-1:2003 et IEC/ISO 62264-2:2004, qui définit les onze fonctionnalités à satisfaire par un MES.

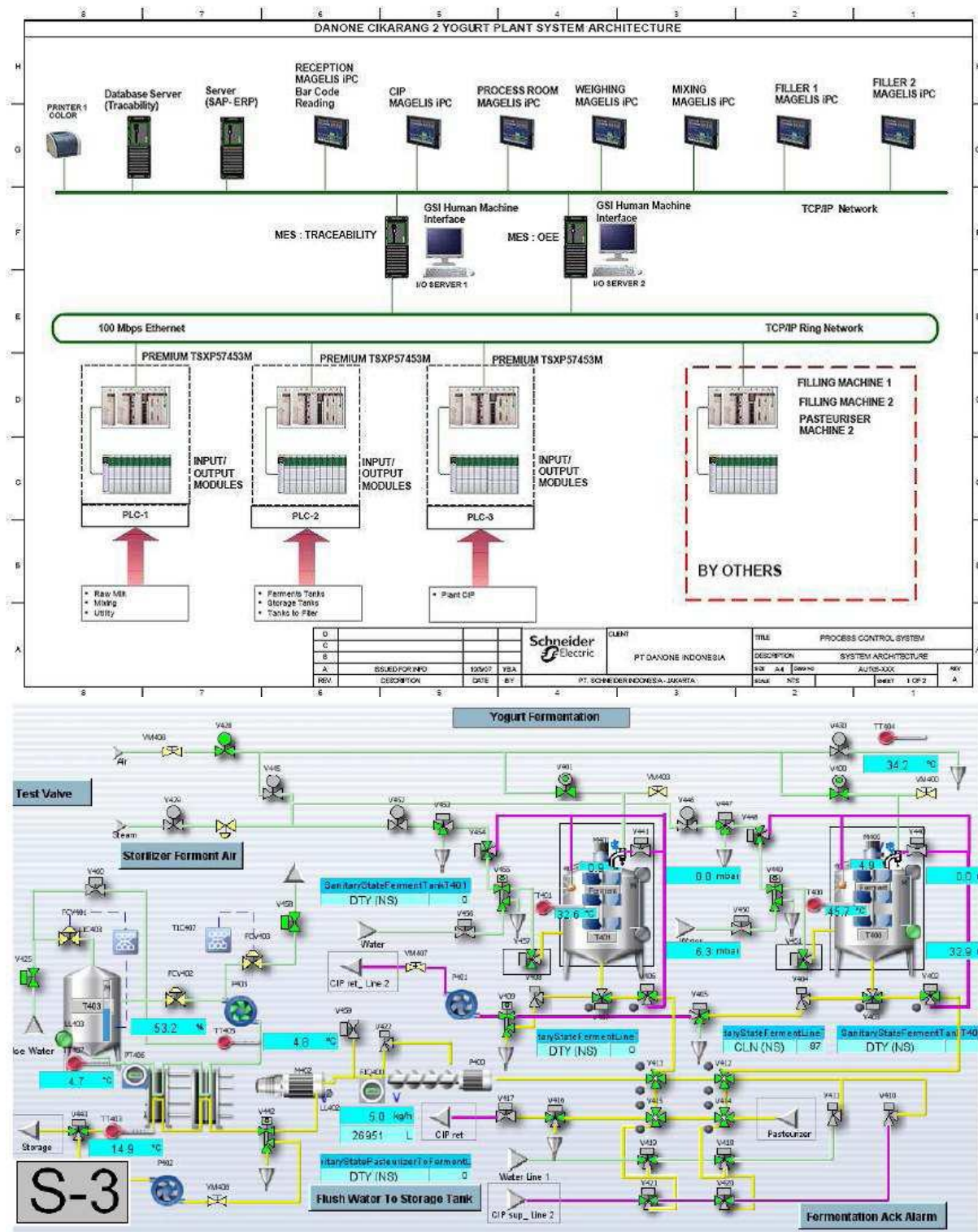
- 1- Acquisition des données
- 2- Ordonnancement
- 3- Gestion du personnel
- 4- Gestion des ressources
- 5- Cheminement des produits et des lots
- 6- Traçabilité produit et généalogie
- 7- Contrôle de la qualité
- 8- Gestion des procédés
- 9- Analyse des performances
- 10- Gestion des documents
- 11- Gestion de la maintenance.



### 3.6 – « Marguerite » des onze fonctions MES définies par l'ISA-95

Chaque entreprise, ou plus généralement chaque secteur industriel, ayant ses propres besoins, les onze fonctions sont généralement modulables afin de satisfaire à une installation au plus juste des logiciels informatiques MES correspondants.

La page suivante visualise une application industrielle de MES.



### 3.7 - Exemple de MES chez Danone, procédé de fermentation pour yaourt : visuels du synoptique de supervision et architecture réseau, technologie SchneiderElectric, d'après logiciel MESboxSCADA d'ordinal

### 3.1.2.5 L'OS

La fonction principale du Système d'Exploitation - ou OS pour Operating System - consiste à relier les ressources matérielles de production et les applications informatiques dédiées à leur pilotage par l'intermédiaire d'un ensemble de programmes. Un tel OS met les données des entrées-sorties périphériques à la disposition des programmes d'application.

Techniquement, les OS disponibles sur le marché se distinguent par leurs délais d'accès aux données et la fiabilité de la transmission entre plusieurs périphériques.

Les systèmes automatisés peuvent être centralisés ou répartis, et donc communicants. Ils se distinguent selon les fournisseurs par les supports physiques des réseaux, les protocoles utilisés souvent propriétaires, la définition du temps réel. Il existe, par exemple, de multiples standardisations s'appuyant sur le protocole IP. [\[Eth05\]](#). Mais ce protocole IP n'a pas pour préoccupation le contenu des paquets transmis ; il ne s'agit là que d'une méthode pour les acheminer « au mieux ». Un tel protocole n'est donc pas fiable d'origine puisqu'il n'offre, pour les paquets envoyés, aucune garantie sur la corruption des données ni sur l'ordre d'arrivée des paquets, sur leur perte ou destruction, sur la ré-émission des paquets non-réceptionnés. Concernant la fiabilité, IP ne s'assure que de l'intégrité des en-têtes de paquets. Lorsque l'en-tête d'un paquet comprend une erreur, alors ce dernier est détruit sans être transmis et aucune notification n'est envoyée à l'expéditeur.

Cependant, des protocoles de niveau supérieur peuvent prendre en charge les garanties qu'IP n'offre pas dans le but même de fournir la plus grande rapidité possible en réduisant le niveau de complexité des routeurs.

Ainsi, les bus de terrain traditionnels - Profibus-DP, Modbus, etc. - tendent cependant à migrer vers un Ethernet aménagé, et plus particulièrement vers des "profils" spéciaux garantissant des giges\* inférieures à la microseconde et un déterminisme quasi absolu. Il existe actuellement plusieurs solutions techniques proposées à la normalisation CEI, parmi lesquelles - dans l'ordre chronologique - Ethernet-Powerlink (B&R, Baldor, Fachhochschule Winterthur), EtherCat (Beckhoff), Ethernet IP / CIP (Rockwell, USA), Sercos III (migration de Sercos fibre optique), ProfiNet-IRT

---

\* La « gigue » est une variation de délai (aussi appelée « jitter » en anglais)



(Siemens). De nombreux industriels tels que Bosch-Rexroth, Indramat, Schneider-Automation suivent de près cette évolution.

### 3.1.2.6 Le stockage par bases de données

Que la structure de l'OS soit hiérarchique, hétérarchique ou mixte, il faut stocker l'information. Puisque la principale technologie actuellement maîtrisée est l'informatique, nous ne détaillerons que celle-ci, mais sommes conscients qu'il existe d'autres modes de mémorisation tel que le cerveau avec ses neurones et synapses biologiques. Ainsi, le stockage informatique de l'information pour sa réutilisation future s'obtient par enregistrement sur un support matériel. Trois fonctions complémentaires sont assurées par ce dernier : la conservation de l'information en lieu sûr pour répondre à une contrainte légale ou conventionnelle - archivage des données -, la mise à disposition de l'information, la réutilisation de l'information - pour le traitement des données -. Un tel stockage s'appuie sur diverses solutions matérielles - magnétiques, optiques, etc. - choisies en fonction de sept principaux critères :

- la fréquence d'utilisation de l'information,
- la criticité de l'information,
- la pérennité de l'information,
- la confidentialité de l'information,
- le volume d'information à stocker,
- le temps alloué au processus de stockage,
- son coût.

Ainsi, une technologie idéale disposera d'une grande capacité et fiabilité, tout en accédant rapidement à l'information pour un coût modique. Mais le chiffrage de telles aptitudes n'est pas aisé puisque dans ce domaine, l'évolution technologique est très rapide. Et, par conséquent, les utilisateurs sont de plus en plus exigeants.

Les informations stockées de manière structurée forment une base de données - abrégée par BD - dont l'organisation facilite la manipulation. En général, on utilise une base de données lorsque l'on a de très grandes quantités d'information à manipuler ; la micro-usine est exactement dans ce contexte.

En informatique, une base de données regroupe les informations sous la forme d'enregistrements stockés dans un système de « fichiers logiques » nommés par la contraction « fichiers » ou de « fichiers physiques » appelés « raw device ».

Afin d'accélérer les opérations de recherche et de tri, les données sont organisées selon un modèle dont la structure physique est équipée d'index. Actuellement, le modèle de données majoritairement utilisé est le modèle relationnel qui autorise une indépendance entre la structure physique et l'organisation logique des données, ce qui n'est pas le cas des modèles hiérarchiques et réseaux.

Certains logiciels sont spécialisés dans la manipulation de bases de données ; on les appelle des systèmes de gestion de base de données - SGBD -. De tels logiciels organisent, contrôlent, modifient et permettent la consultation de la base de données par l'intermédiaire de « requêtes ». Le langage de requête le plus couramment employé pour les modèles relationnels est le langage SQL - Structured Query Language, ou Langage structuré de requêtes -.

Une base de données contient des informations classées par nature. Les différentes natures intervenant sont connexes - exemple : machine, outils, techniciens, planning de réservations -. Un enregistrement réunit un petit groupe de données auquel il correspond une entité.

L'organisation sémantique des différentes entités stockées dans une base de données forme le modèle de données.

Soit le modèle de données est hiérarchique, auquel cas des relations père-fils sont établies entre les différentes entités selon une organisation en arborescence. Soit le modèle est en réseau avec des relations « de-à » entre les entités, selon une organisation arbitraire. Un tel modèle relationnel, initié à la base par la thèse en mathématique de M. Edgar F. Codd d'IBM, est par exemple utilisé par Oracle Corporation. L'idée générale consiste à regrouper les enregistrements dans des tables et à utiliser les informations présentes dans les pointeurs des enregistrements pour assurer les liens entre les informations. Ainsi, un tel regroupement permet d'obtenir une table en résultat à une recherche dans une base de données.

Ce modèle, abusivement appelé relationnel, s'appuie sur un formalisme entité-association, il est plus connu sous l'abréviation ERD - Entity relationship diagram pour Diagramme entité-association -. L'organisation logique des tables dans les bases de données relationnelles se schématise grâce à ce type de diagramme dans les phases amont de conception des systèmes d'information permettant des descriptions de haut niveau des modèles conceptuels de données.

Enfin, il existe des tests de performances des bases de données, appelés Benchmark, destinés à déterminer la meilleure solution informatique en terme de stockage et traitement de l'information.

### 3.2 Modélisation des SI par UML

Le premier langage graphique à avoir été utilisé de 1970 à 1990 pour décrire un SI à été le « Modèle relationnel binaire », communément appelé NIAM pour « Nijssen Information Analysis Method » du nom de son précurseur M. Nijssen, ingénieur chez Control Data Europe. Une concurrence est ensuite apparue avec la méthode MERISE qui s'est imposée dans les années 1980 à 2000. Désormais, il est reconnu par la communauté [\[Eyn04\]](#) de modéliser les données et traitements d'un SI à partir d'un langage graphique appelé Unified Modeling Language, UML. Ce langage est régi par l'Object Management Group qui, à ce jour, définit la version 2.3 d'UML [\[Pil06, Aud09, OMG\]](#).

L'usage généralisé d'UML permet une généricité ainsi qu'une interprétation facilitée, unique, indépendamment de la langue maternelle des personnes impliquées dans la modélisation. Par ailleurs, les outils numériques de représentation des diagrammes UML sont maintenant en mesure de convertir automatiquement les schémas en code informatique interprétable par un OS. Cette passerelle permet un gain de temps dans le développement et la mise en œuvre d'un nouveau SI.

Au préalable, détaillons brièvement les principes d'UML :

Il existe une large diversité de diagrammes UML, quatorze<sup>4</sup> au total, permettant notamment une modélisation du comportement d'un système d'information. Ces diagrammes sont regroupés en trois familles, en fonction principalement de la description correspondante.

Un important diagramme d'un modèle UML est le « diagramme des classes » qui, comme son appellation l'indique, permet l'organisation autour de classes selon une structure de modélisation orientée objets. Cette description est issue de la famille des « diagrammes structurels », ou encore « statiques », dans la mesure où elle ne décrit pas la dynamique de l'évolution du système. Sept diagrammes appartiennent à cette famille.

Une seconde famille de diagrammes regroupe trois « diagrammes comportementaux », dont le principal représentant est le « diagramme des cas d'utilisation ». Ce dernier a pour mission de décrire les interactions possibles entre

---

<sup>4</sup> Le quatorzième diagramme (de profil) a été officialisé par l'OMG en mai 2010 avec UML 2.3.

des acteurs extérieurs au système et le système en question ; on y retrouve toutes les fonctionnalités offertes par le système.

Enfin, la troisième famille offre quatre « diagrammes d'interactions », encore appelés « diagrammes dynamiques ». Ils permettent effectivement une représentation séquentielle des traitements de l'information, des interactions entre les constituants du système - éléments internes ou acteurs externes -, des échanges de messages - la communication -. Ils offrent aussi la possibilité d'une description des successions de scénarii de production possibles, et des évolutions temporelles d'une donnée.

Pour ce qui est de la représentation de nos modélisations UML, nous avons utilisé le logiciel Poseidon [[pos](#)] qui propose une bibliothèque des symboles requis pour les diagrammes.

Cet outil dispose d'un avantage non négligeable pour les développeurs informatiques puisqu'il présente la génération automatique de code. Nous n'avons cependant pas poussé notre prospection jusqu'à cette implémentation matérielle et logicielle afin de, préalablement, valider notre architecture par simulation via un réseau de Petri.

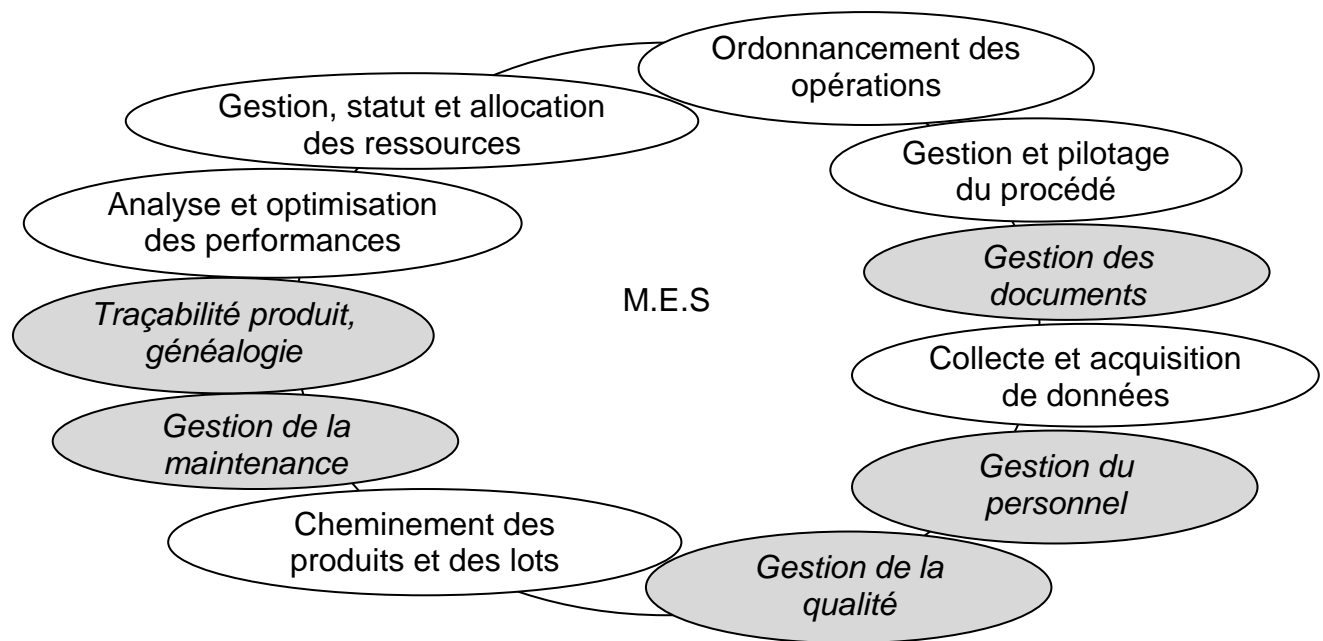


### 3.3 Caractérisation du SI de la micro-usine avec UML

Cette partie nous permet de définir la stratégie de commande correspondant à notre concept de micro-usine modulaire. Il s'agit de la seconde étape de notre étude.

En réponse au besoin spécifique introduit dans le chapitre 1, parmi les onze fonctions du système MES répertoriées par l'ISA-95 (voir figure 3.8 - Les six fonctions MES retenues parmi les onze de l'ISA-95), cinq sont peu concernées par notre cadre d'application, et nous les avons volontairement occultées. Il s'agit de :

- la « gestion des documents » (n°10), puisqu'un tel savoir-faire est déjà largement maîtrisé à l'échelle méso et qu'il ne devrait pas poser a priori de difficultés à notre échelle ;
- la « gestion du personnel » (n°3), pour la même raison mais il est important d'indiquer que la quantité de personnel impliqué dans le fonctionnement d'une micro-usine est malgré tout présente dans la prise en compte du coût de production ;
- la « gestion de la qualité » (n°7) : cette fonction ne semble pas présenter également d'intérêt majeur à l'échelle microscopique si ce n'est que les mesures, contrôles et autres prises d'information sur la qualité sont moins évident qu'à échelle méso ;
- la « gestion de la maintenance » (n°11), puisqu'en cas de panne, nous avons choisi le remplacement à l'identique justifié par le relatif faible coût des modules ;
- la « traçabilité produit et généalogie » (n°6) doit pouvoir être traitée comme à l'échelle méso mais une spécificité apparaît puisqu'à échelle micro, le processus évolue dorénavant en permanence pour améliorer la productivité.



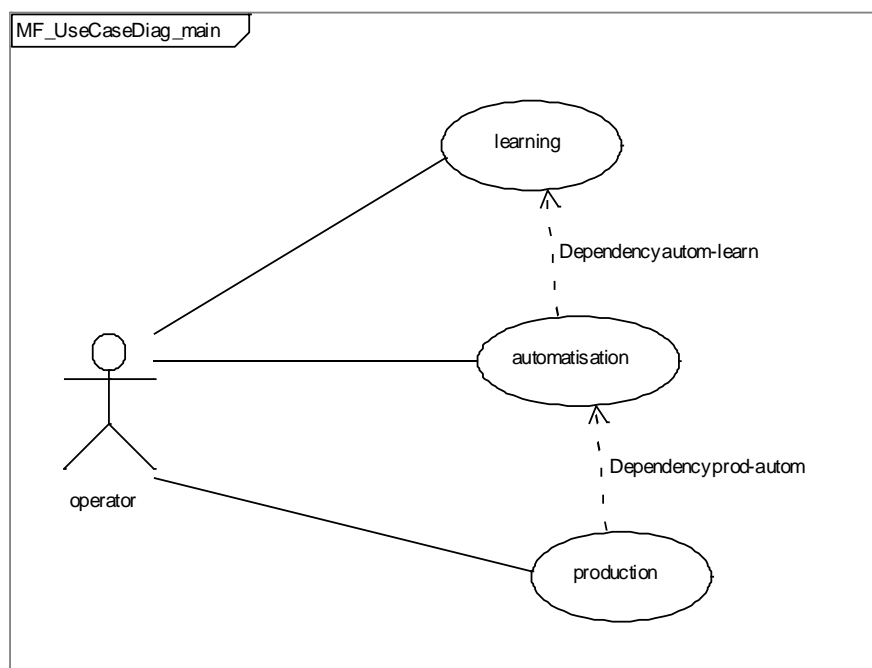
### 3.8 - Les six fonctions MES retenues parmi les onze de l'ISA-95

L'analyse des six autres fonctions du MES nous permet d'identifier les besoins propres au micromonde :

- l' « ordonnancement des opérations » (n°2) - la mise en œuvre du procédé de fabrication, c.à.d. sa conception - ; il sera déterminé initialement en fonction des données connues et recensées, puis évalué et remis en cause en permanence, rendant évolutif le processus de génération, pour permettre le critère de reconfigurabilité en cours de production et de réorganisabilité à chaque nouvelle production ;
- la « gestion et pilotage des procédés » (n°8) : leur validation par la simulation et l'expérimentation télé-opérée en mode manuel, l'actualisation de gammes, la traçabilité et l'archivage des processus, sont autant d'évolutions du système d'information imputables au  $\mu$ -monde ;
- la « collecte et l'acquisition de données » (n°1) : d'une part, il s'agit de l'unique possibilité d'information de l'opérateur sur l'état du  $\mu$ -monde, d'autre part, elles permettront la capitalisation de savoir-faire ;
- le « cheminement des produits et des lots » (n°5) : les transferts entre les cellules, au sein même d'une cellule, et l'alimentation en matière première sont une préoccupation importante avec les microcomposants ;

- l'« analyse et optimisation des performances » (n°9) : cette fonction est l'aspect majeur de la reconfiguration grâce à la mise en place d'indicateurs, et aux connaissances capitalisées. Dans un contexte mondial d'utilisation des micro-usines, la capitalisation peut être partagée entre plusieurs systèmes de production ou monnayée entre partenaires industriels ;
- la « gestion des ressources, le statut et l'allocation des ressources » (n°4) : le développement matériel de cellules et d'éléments modulaires, leur évolution, la professionnalisation de chaque cellule rendent cette fonction spécifique aux systèmes de production de microproduits. Le partage de connaissance défini par les précédentes fonctions peut se compléter d'un partage des ressources matérielles -en cellules ou éléments modulaires- entre divers acteurs professionnels.

Le premier diagramme des cas d'utilisation fait apparaître trois phases distinctes qui se complètent dans la mise en œuvre de la micro-usine.

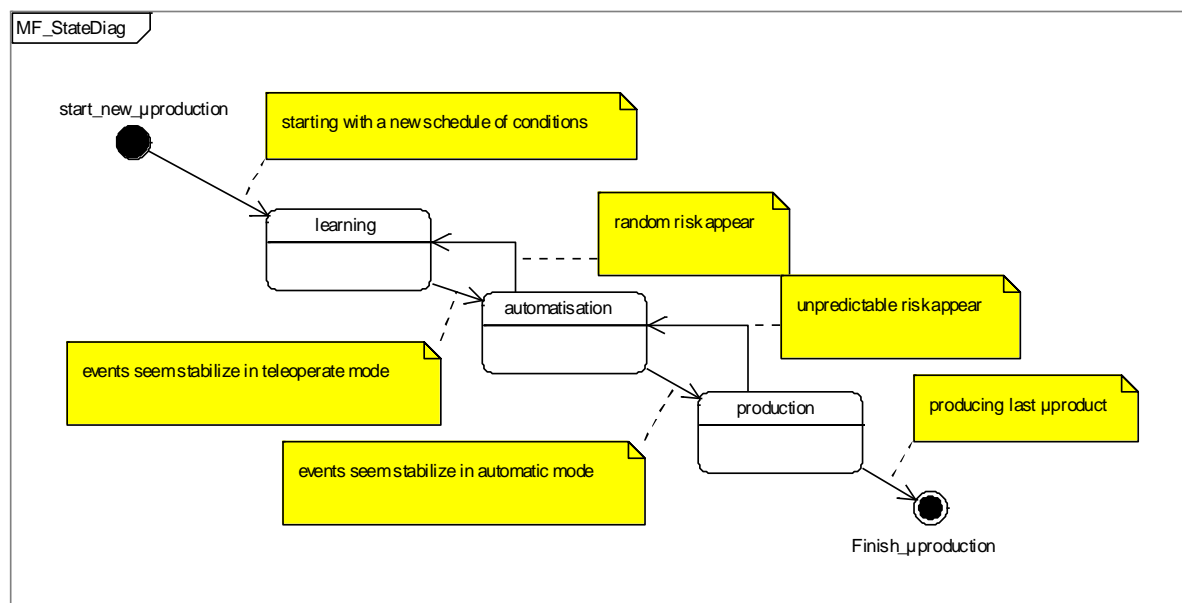


**3.9 - Diagramme principal des cas d'utilisation de la micro-usine**

Remarque : les dépendances présentes dans ce diagramme signifient que le cas d'automatisation dépend de l'apprentissage mais également que le système poursuit son apprentissage durant le cas d'automatisation. De même, le cas de production

dépend de celui d'automatisation pour optimiser le procédé face aux aléas dus à la physique complexe et inhabituelle du micromonde. Ainsi la situation d'apprentissage est permanente.

Le diagramme d'états suivant permet d'appréhender l'évolution temporelle d'une production. Cette même évolution étant reconduite pour la production d'une série d'un microproduit suivant mais ayant, de par son historique des productions précédentes, capitalisé des connaissances et savoir-faire.



### 3.10 - Diagramme d'état de la micro-usine par production

La lecture de ce diagramme d'états s'interprète comme telle :

- tout d'abord, l'opérateur confronté à la mise en production d'un microproduit aborde la phase d'apprentissage. Il s'agit de l'exploitation du savoir-faire acquis par les expériences passées. Certains matériels subissent alors des réglages et l'intervention requiert beaucoup de télé-opérations. Notons que, durant cette phase, de multiples scénarii - ordonnancements techniques -sont envisagés voire expérimentés. La diversité de scénarii est obtenue à partir de la génération de nouvelles connaissances grâce à l'assistance d'une intelligence. Cette phase se termine lorsque le fonctionnement et la réussite des principales opérations ne sont plus du tout aléatoires, ou alors qu'un taux de réussite est satisfaisant et relativement constant ;
- ensuite, la production est automatisée de sorte à libérer la ressource opérateur. Cette automatisation s'appuie elle-aussi sur un savoir-faire

antérieur mais également sur une intelligence apte à proposer de nouvelles solutions. Cette phase aboutit à un paramétrage de la PFPM et de l'ensemble des cellules la constituant ainsi qu'à leur étalonnage et leur calibration ;

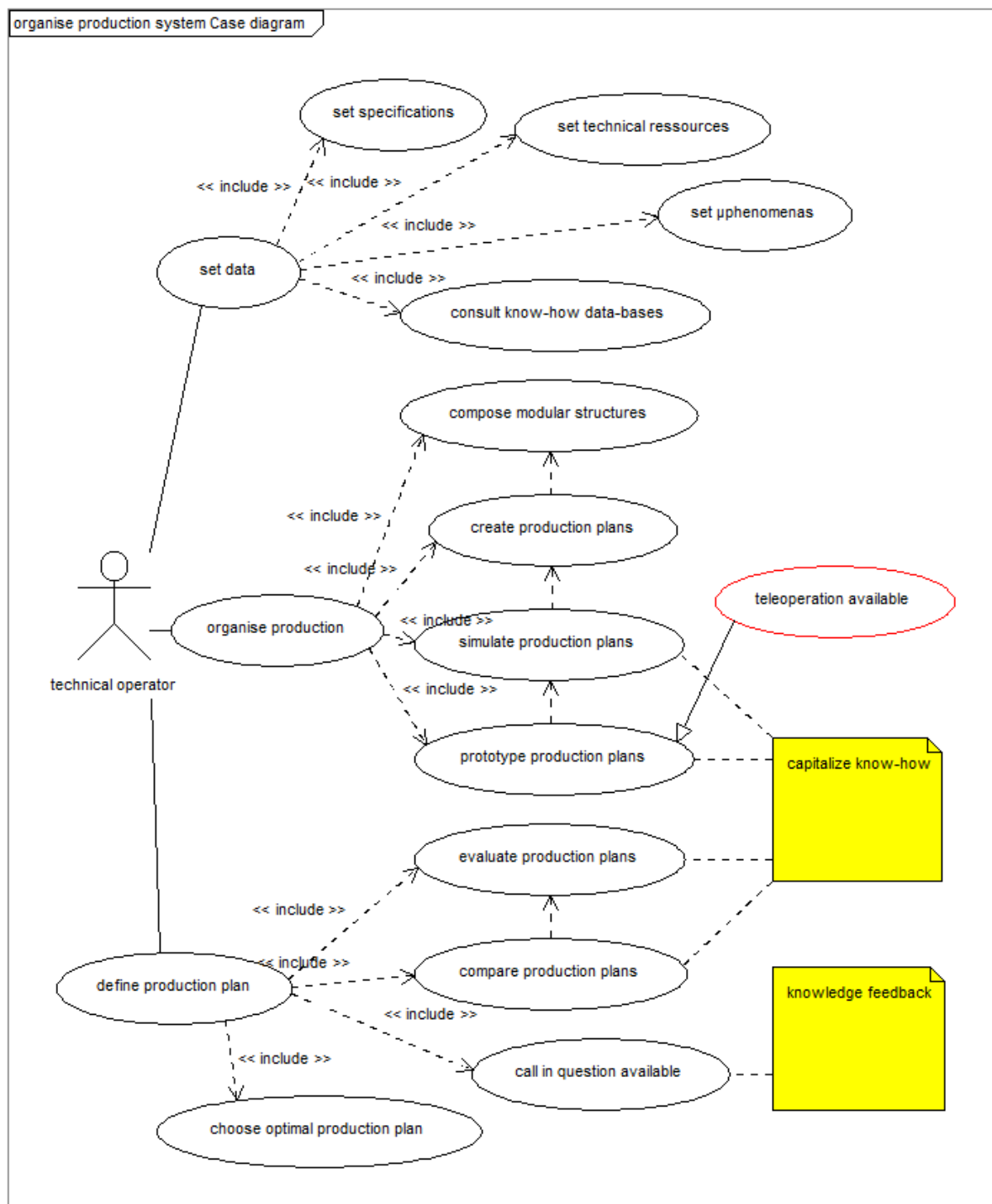
- enfin, la mise en production d'une moyenne ou grande série permet la validation du procédé obtenu tout en restant attentive à une possible dérive imputable à une caractéristique ou un phénomène jusque-là négligeable et négligé. Cette dernière phase est prospective à l'heure actuelle.

Le détail de la mise en œuvre des deux premiers cas d'utilisation présentés précédemment est développé ci-dessous. Le troisième cas de mise en production automatique, beaucoup plus prospectif à ce stade de l'avancement, n'est pas traité dans l'immédiat. Il s'agira principalement pour ce dernier cas d'activer des indicateurs de suivi de production et d'assurer une observation ainsi que des enregistrements des paramètres de production mais aussi des grandeurs issues des cellules afin de s'assurer de l'absence d'une éventuelle dérive mais aussi, le cas échéant, de disposer de l'historique pour permettre une nouvelle prospection et idéalement une identification directe du comportement inattendu.

Ainsi l'organisation de la production par un opérateur technique s'articule autour de trois cas d'utilisation du système de production (voir Fig. 3.11). Chacun de ces cas est associé à une série de cas qu'il inclut. Le premier cas consiste à renseigner les données du cahier des charges de production, des ressources techniques matérielles disponibles, des probables phénomènes liés à la physique du micromonde, et enfin des bases de données des savoir-faire spécifiques. Le second cas consiste à organiser la production à travers la composition de cellules, la planification de plusieurs gammes possibles de production grâce à un retour des connaissances antérieurement acquises, la simulation éventuelle de tout ou partie des phases de production des diverses gammes, et enfin la validation expérimentale de ces phases - éventuellement par des essais téléopérés -. En simulation comme en expérimentation, il se produit une capitalisation de nouveaux savoir-faire puisque ces derniers sont appliqués à un nouveau microproduit différent de tous ceux pratiqués lors des productions antérieures. Ces cas inclus dans l'organisation de la production sont associés entre eux afin de signifier leurs dépendances hiérarchiques, et donc par la suite leurs dépendances chronologiques. Le troisième cas consiste à définir la gamme de production finale par une évaluation et une comparaison des



diverses gammes envisagées, par une remise en cause -puisqu'il se peut qu'un compromis entre plusieurs gammes soit retenu- et enfin par le choix d'un enchaînement optimal de phases de production. Il est également question de capitaliser un savoir-faire lors de l'évaluation et de la comparaison car il s'agit d'établir des critères de performance parfois nouveaux qui auraient pu influencer les productions antérieures.



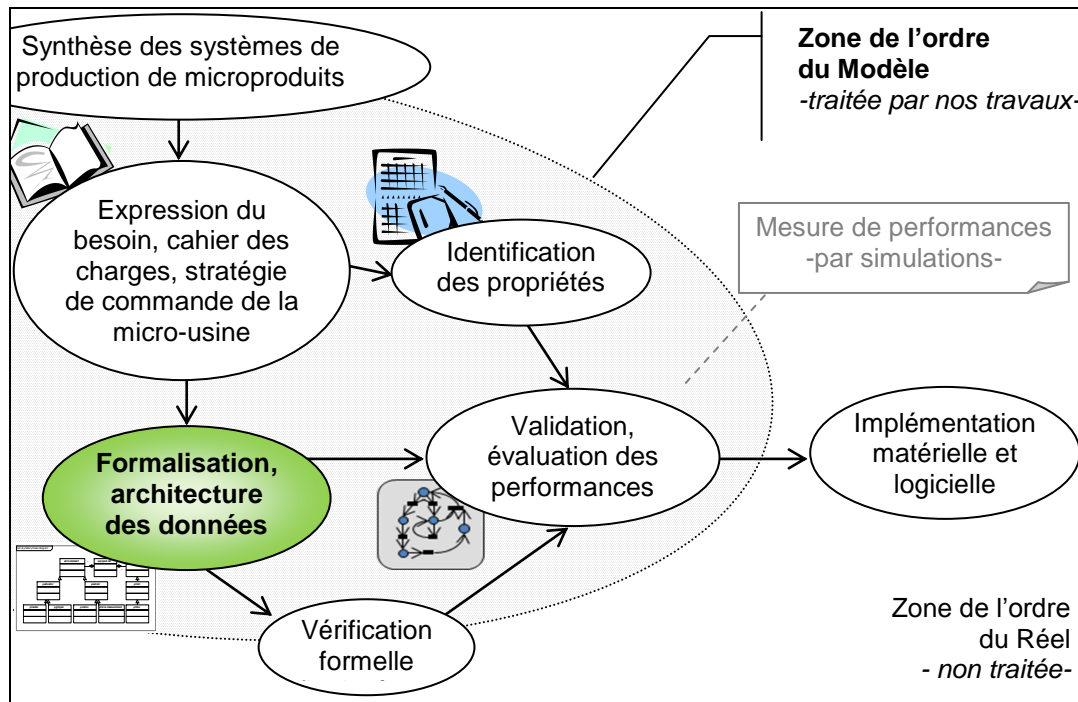
3.11 - Diagramme des cas d'utilisation du système d'organisation de la production

Nous proposons en annexe (§ 6.3, Fig. 6.8) le diagramme du premier cas d'utilisation de niveau deux, relatif à l'acquisition des spécifications de production. Ce diagramme utilise des généralisations comme principal type d'association.

De tels diagrammes ont permis de définir le fonctionnement de la micro-usine pour satisfaire les objectifs fixés au chapitre 2. La suite de cet exposé introduit une architecture du système d'information permettant un tel fonctionnement.

### 3.4 Définition de l'Architecture du SI avec UML

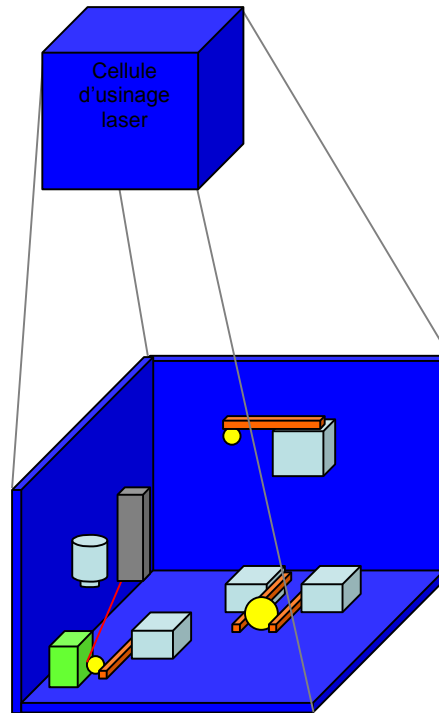
La formalisation de l'architecture des données intrinsèques à la micro-usine est la troisième étape de nos travaux. Elle aboutit à la définition, selon le formalisme UML, des constituants matériels et logiciels – de contrôle, commande et connaissance –.



3.12 - Méthodologie de travail, étape de formalisation, définition de l'architecture des données

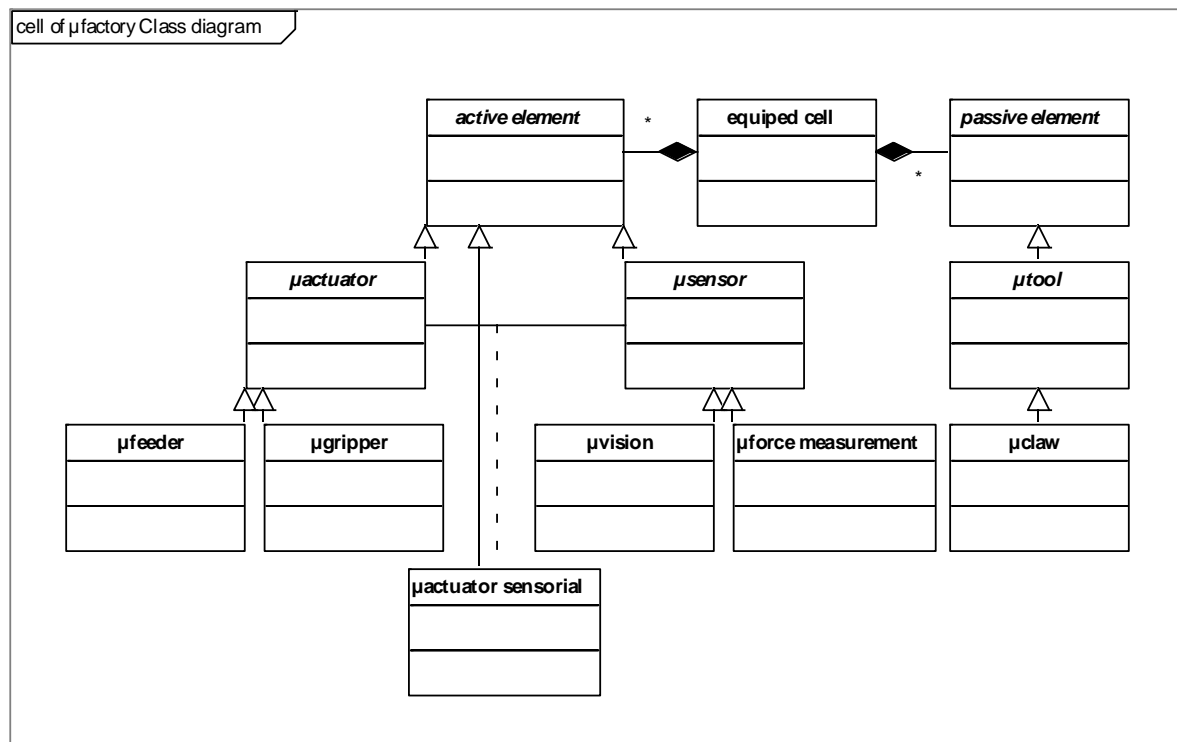
#### 3.4.1 La cellule

Notre concept de micro-usine s'appuie sur l'utilisation de cellules de production. Lors de sa conception, chaque « cellule de base » fait l'objet d'études spécifiques [Rak06, Hér08c, GauM06a]. Elle possède des micro-actionneurs et/ou microcapteurs agencés entre-eux de manière précise dans le but de permettre certaines fonctionnalités. La cellule comporte des paramètres d'entrées et de sorties qui sont nécessairement accessibles au système d'organisation et par conséquent à l'opérateur. Dans la mesure du possible, des modélisations du comportement de la cellule sont fournies avec la cellule notamment pour sa simulation, lesquels modèles sont enrichis au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances propres à l'utilisation de la cellule.



**3.13 - Principe de la structure physique d'une cellule**

Par ailleurs, une telle cellule de base est au besoin modifiée par l'ajout d'éléments actifs et/ou d'éléments passifs. Nous définissons un « élément actif » comme un organe disposant d'Entrée(s)-Sortie(s) – e. g. capteur ou actionneur -, et un « élément passif » comme un organe ne disposant pas d'Entrée-Sortie – e. g. outil simple -. Cette construction d'une cellule dite équipée à partir de la modularité des éléments actifs ou passifs est illustrée sous UML par le diagramme des classes suivant.

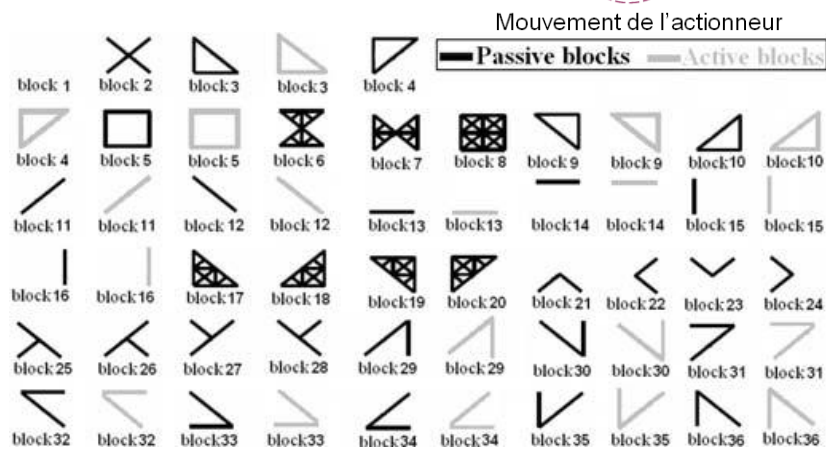
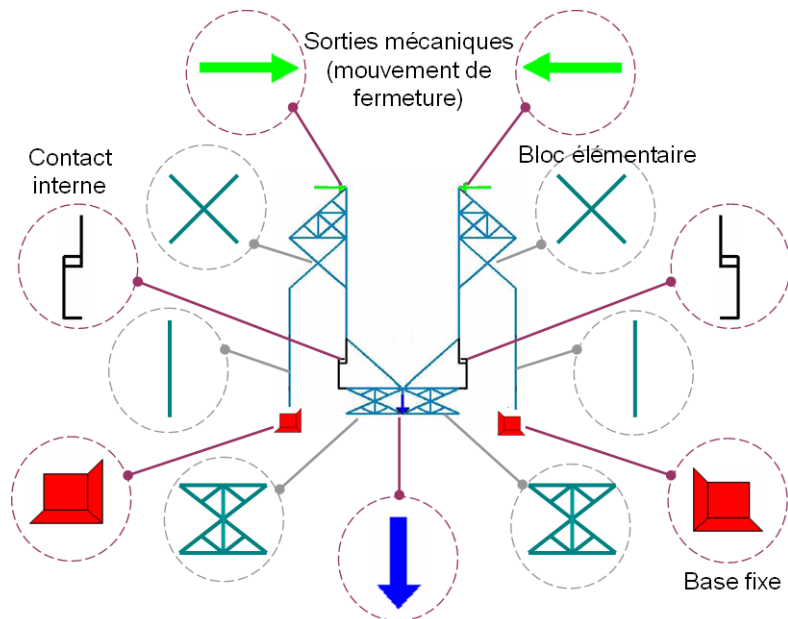
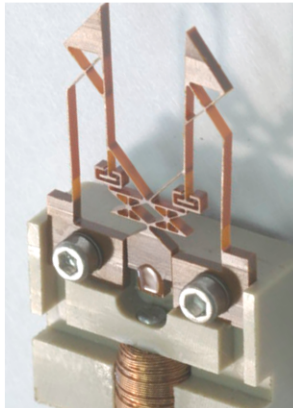


3.14 - Diagramme des classes d'une cellule de micro-usine

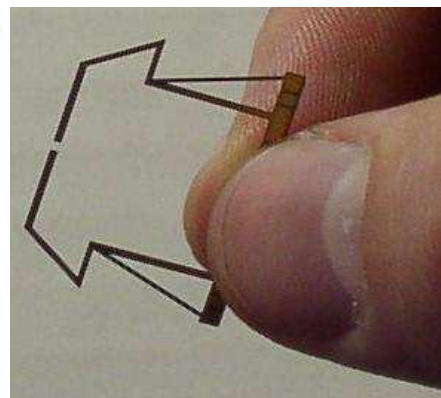
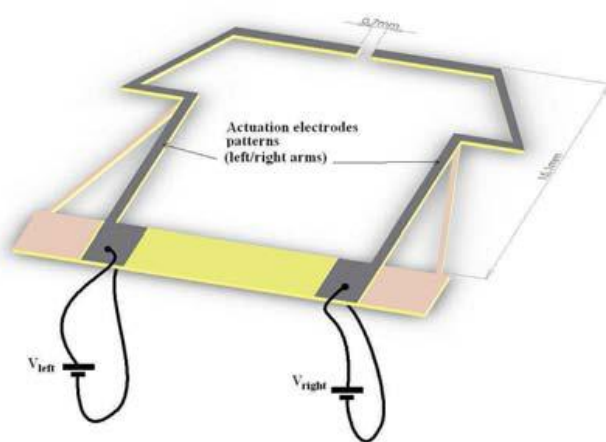
La notion originale de ce diagramme des classes réside dans la présence de la classe d'association de la famille des éléments actifs appelée « micro-actuator sensorial », qui se constitue à partir de micro-actionneur et de microcapteur afin de construire un micro-actionneur asservi. Par exemple, il en est ainsi pour un doigt de positionnement asservi en effort.

Cette description basée sur une décomposition modulaire en éléments actif(s) et/ou passif(s) est, par ailleurs, reprise par les récents travaux de développement de mécanismes de type treillis à la fois plans et compliant [Gro09], au sein du CEA en collaboration avec notre laboratoire – voir l'illustration page suivante -. Cette démarche est couplée au développement d'un logiciel Flex-In d'assistance à la conception de tels mécanismes. Pour cette mise en œuvre au travers de structures, l'appellation « bloc » a été utilisée ; le terme « élément » que nous choisissons d'adopter est générique par rapport à ces blocs structurels et peut aussi s'appliquer, par exemple, aux cas d'un détecteur ou d'un actionneur tels qu'une matrice CCD ou une diode laser, toutes deux « actives », et leurs lentilles d'optique « passives ».

Prototype de micropince en polyimide optimisée par FlexIn

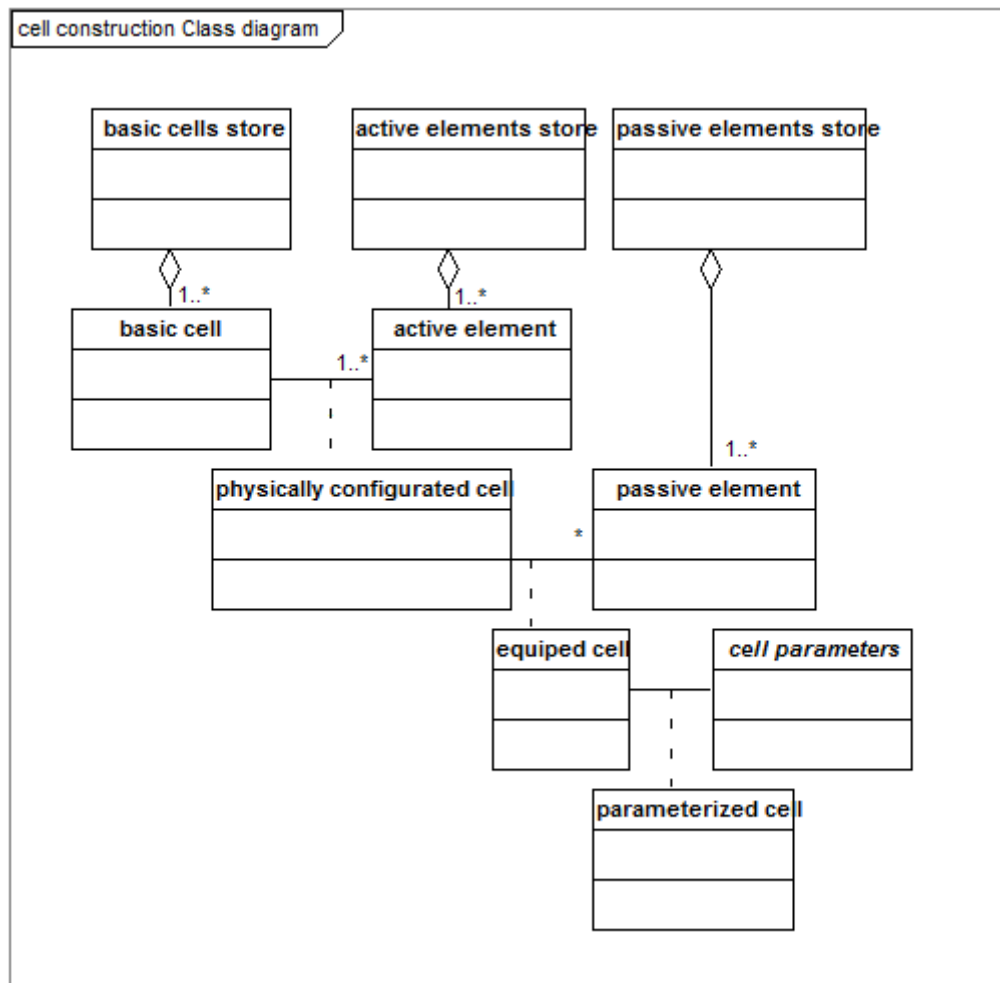


3.15 - Exemple de blocs élémentaires modulaires passifs-compliants ou piézo-actifs, pour la synthèse de mécanismes compliants avec FlexIn, CEA-LIST UFC-femto-st-AS2M [Gro09]



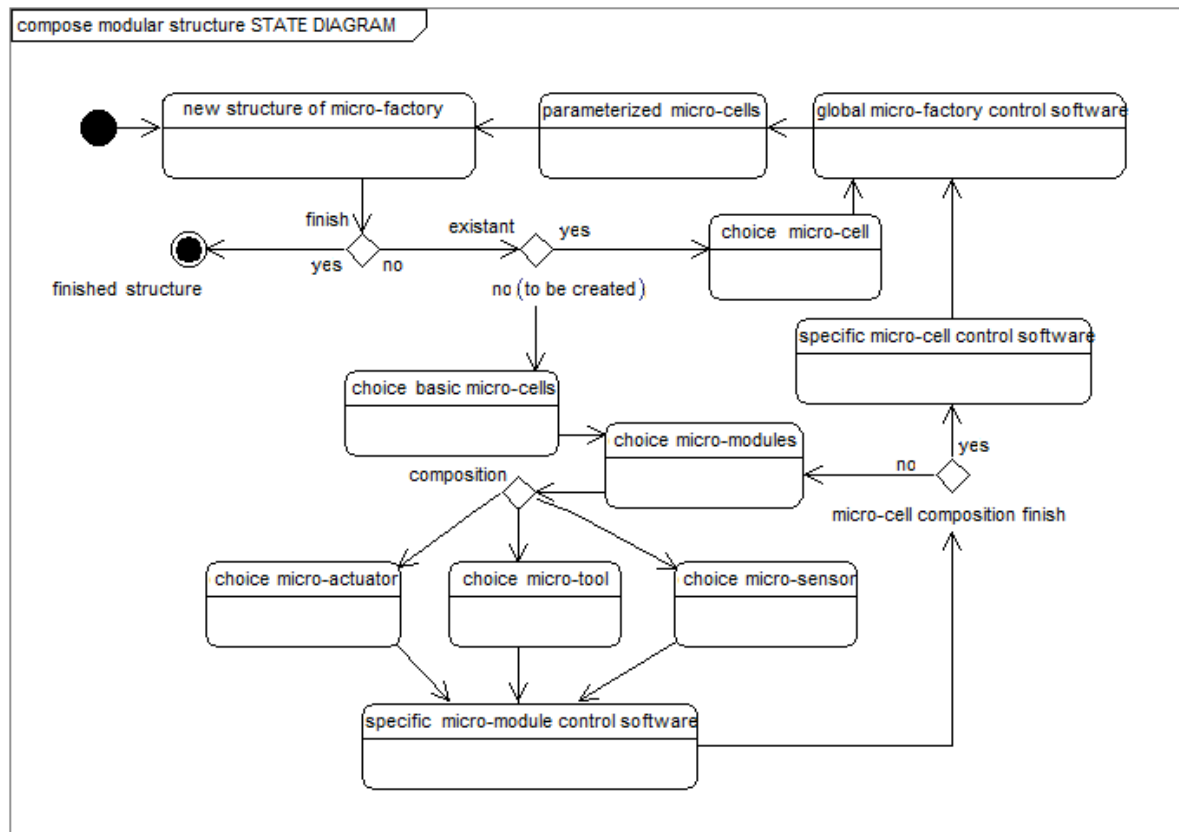
3.16 - Exemple d'une micropince construite par modules, CEA-LIST UFC-femto-st-AS2M [Gro09]





3.17 - Diagramme des classes de construction d'une cellule

Chaque cellule utilisée pour la mise en œuvre d'une tâche de la gamme de production fait initialement l'objet d'une simulation et/ou d'une expérimentation afin de valider son paramétrage. Ce dernier comporte au minimum les valeurs propres au microproduit, micro-assemblages et microcomposants concernés par la tâche. Ensuite, une partie des paramètres du mode de fonctionnement automatique, autonome, doit également enrichir la cellule en question. A ce sujet, il est d'usage de distinguer l'appellation « station » de celui de « cellule ». La station se veut surtout téléopérée dans un contexte de développement technologique. Il s'agit en quelque sorte d'un micro-poste, une sorte d'établi du micromonde - forcément téléopéré mais à forte compétence humaine -. En revanche, la seconde dénomination « cellule » inclut une forte valeur ajoutée dans le pilotage, elle concerne un usage semi-automatisé - voire intégralement automatisé - de production industrielle de microproduits mais aussi de définition du meilleur compromis de scénario de production.



### 3.18 - Diagramme d'états relatif à la composition d'une structure modulaire de production

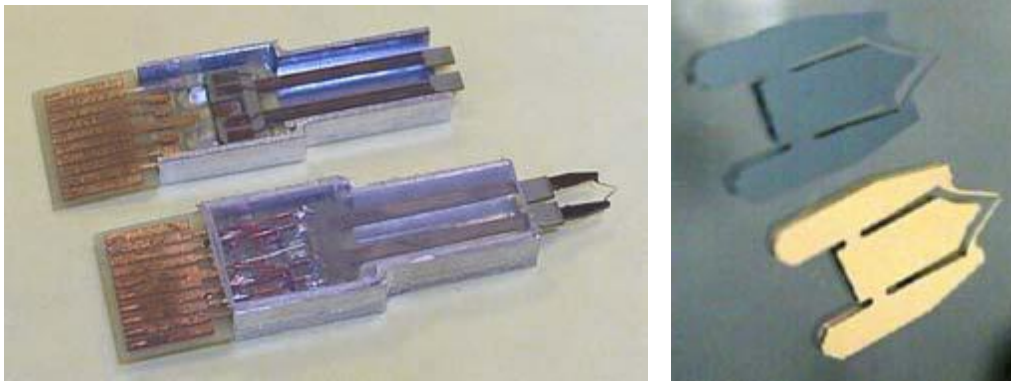
Ce diagramme (figure 3.18) aide à appréhender les états<sup>5</sup> par lesquels passe chaque cellule en cours d'élaboration. Pour chaque nouvel élément constituant une cellule, on observe que l'on passe par un état de renseignement des paramètres spécifiques à cet élément. Une fois l'ensemble des éléments intégrés pour former la cellule en question, alors la micro-usine est dans un état de définition du système de commande global ainsi que des paramètres de la cellule.

Soulignons que chaque nouvelle cellule ainsi constituée passe nécessairement par un état de calibration, étalonnage, initialisation. Avec, par ailleurs, l'apprentissage des nouveaux comportements par modélisation ou identification, il s'agit de renseigner au maximum les informations nécessaires à son pilotage à venir.

<sup>5</sup> Il a été choisi de modéliser cette composition de la micro-usine à partir d'un diagramme d'états car, telle que nous la souhaitons, au cours de son cycle de vie, elle est impérativement amenée à passer par les états mentionnés. Une autre description par diagramme d'activités - dont la description est proche de celle d'un organigramme - serait tout aussi pertinente à condition de recenser les activités et de leur attribuer ensuite à chacune un verbe d'action.

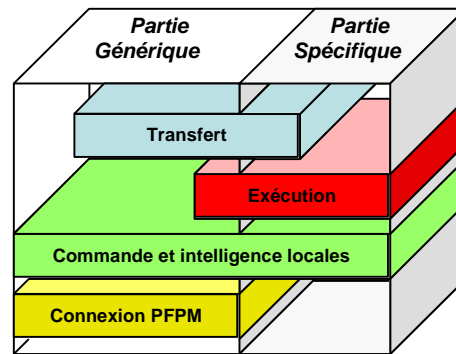
Néanmoins, le travail préliminaire à la mise en service d'une cellule réorganisée est important et peut être chronophage, car pour la validation des modèles à venir, il faut quantifier un maximum de performances.

La figure 3.19 permet une visualisation d'éléments passifs, d'organes terminaux - micro-tool -, Silicon Finger Tips - *SiFiT* - [[Agn09](#)] et la micropince qui les meut grâce à ses éléments actifs à principe piézoélectrique. A titre d'exemple, les informations des paramètres associés à de tels éléments, et donc les attributs des classes d'objets correspondantes, sont : l'enveloppe du domaine de travail, la précision du positionnement, les vitesses maximales, la géométrie des organes terminaux, leurs raideurs selon diverses directions, leur résistance mécanique, les matériaux, leurs rugosités de surfaces, etc.



**3.19 – Éléments actifs de type « Micropince MMOC » à 4 ddl et ses organes terminaux « SiFiT » passifs**

D'un point de vue structurel, une cellule comporte une partie générique et une spécifique répondant au besoin technique de micromanipulation et micro-assemblage. En conséquence, la partie spécifique requiert une couche de l'ordre de l'exécution, une de l'ordre de la commande locale et une pour le transfert intra-cellule de microcomposants. La partie générique va permettre, quant à elle, le transfert inter-cellules - éventuellement via la PFPM -, la commande locale et la connexion avec son environnement - la PFPM est détaillée au paragraphe suivant -.



3.20 - Principe de la structure organique d'une cellule

### 3.4.2 La PFPM

Après avoir défini l'usage de multiples cellules modulaires, la structure initiale de la production est définie en s'appuyant sur divers critères provenant des spécifications de la production. L'organisation des cellules utilisées forme la Plate-Forme de Production des Microproduits. Rappelons que cette plate-forme abrégée par PFPM a déjà été introduite au paragraphe 0 - figure 2.56 -, dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- l'architecture de la PFPM s'articule autour de trois organes standards de connexion servant d'interface de communication, d'énergie - éventuellement de diverse nature : électrique, fluide, mécanique, magnétique, etc. -, de microcomposants et microproduits. Les trois flux correspondants s'appuient, selon les cas, sur un support matériel ou immatériel ;
- au besoin, la PFPM dispose d'un environnement spécifique - salle blanche, enceinte antivibratoire, milieu fluide, salle noire - ;
- contrairement aux lignes de production du mésomonde souvent linéaires, la PFPM peut se déployer en suivant deux dimensions - organisation matricielle ou triangulaire, circulaire, etc. -, voire dans les trois dimensions - organisation parallélépipédique, sphérique, cylindrique, conique, pyramidale, par couches, etc. -. Il n'est pas non plus exclu d'apporter une dynamique à cette PFPM dès lors que les cellules sont amenées à évoluer.

Du fait de cette mobilité géographique des cellules, et afin de gérer les flux de microcomposants et microproduits tout en assurant leur traçabilité, il s'agit, pour le système d'information général, de disposer de ces données afin de les

distribuer selon le besoin. Au minimum, l'échange d'informations inter-cellules est nécessaire lors du transfert d'un microcomposant d'une cellule à une autre.

### 3.4.3 L'IHM

La définition d'une « interface homme-machine » évoluée rend accessible le micromonde à l'opérateur pour l'observation ou la télé-opération et, d'une manière générale, sa compréhension progressive qui lui apporte des compétences spécifiques à cette échelle, utiles au déploiement de processus.

Machinalement, compte-tenu de l'équipement habituel d'un ordinateur et par inertie cérébrale, les premières interfaces de pilotage se sont appuyées sur un clavier et un écran. Un premier pas dans l'ergonomie et l'efficacité a été franchi avec l'arrivée de joystick, puis de souris-spatiales. Ces derniers capteurs d'information permettant l'envoi de consignes de l'opérateur vers le micromonde se sont enrichis grâce aux retours d'effort. Il est intéressant d'observer que ces informations nous parviennent par palpation, puisque le sens du toucher est mis à contribution en complément du sens visuel. Il s'avère être une détection de pression à la surface de la peau.

De même, d'autres sens peuvent être sollicités par une IHM évoluée : l'ouïe avec l'usage de haut-parleurs, éventuellement un casque stéréophonique. La vision jusqu'à présent sollicitée par une « information plane » sur un unique écran-moniteur a également connu l'apparition d'écrans supplémentaires pour offrir de nouveaux points de vue. En scindant l'écran initial par multi-fenêtres, le gain est principalement axé sur la résolution ce qui permet de profiter de la totalité du champ visuel. Mais la multiplication des écrans n'est qu'une alternative provisoire dans l'évolution vers la stéréovision. La solution ne réside pas nécessairement dans l'accès à une multitude d'écrans gigantesques - comme si l'on allait vaincre par la grandeur une frustration de n'être pas assez petit pour s'immerger dans le micromonde - mais dans l'usage de lunettes de stéréovision, ou d'appareillage de visualisation spatiale - lunettes à cristaux liquides avec un écran à double affichage alterné et synchronisé, ou lunettes à verres rouge et bleu « cinématographique », ou encore par reconstruction spatiale tel que cela a été démontré par le PhD Johnny Chung Lee et la simple console Wii [[JohLee](#)] -.

L'envoi d'information par l'opérateur à destination de la micro-usine peut lui aussi s'extraire du traditionnel triplet « clavier, souris, joystick ». L'usage d'une ou de plusieurs caméras observant les mouvements spatiaux du corps de l'opérateur permettent à un logiciel évolué d'interpréter des consignes de pilotage. Ce principe a déjà été mis en œuvre dans la micromanipulation en environnement aqueux par



billes de silicium [Why06] –technologie présentée et illustrée ci-après-. Tout comme le casque stéréophonique va permettre une communication d'informations à l'opérateur, la commande vocale est une des pistes d'évolution qui libérera les mains du traditionnel clavier.

Notons au passage que l'organisation de ce clavier QWERTY, qui assure le contrôle d'ordinateurs de plus en plus puissants, remonte à 1878 avec l'invention de la machine à écrire et sa commercialisation par Remington [Jac02]. Le but recherché par l'implantation des lettres sur les touches n'était autre que de permettre aux commerciaux d'écrire « typewriter » le plus rapidement possible lors des démonstrations.

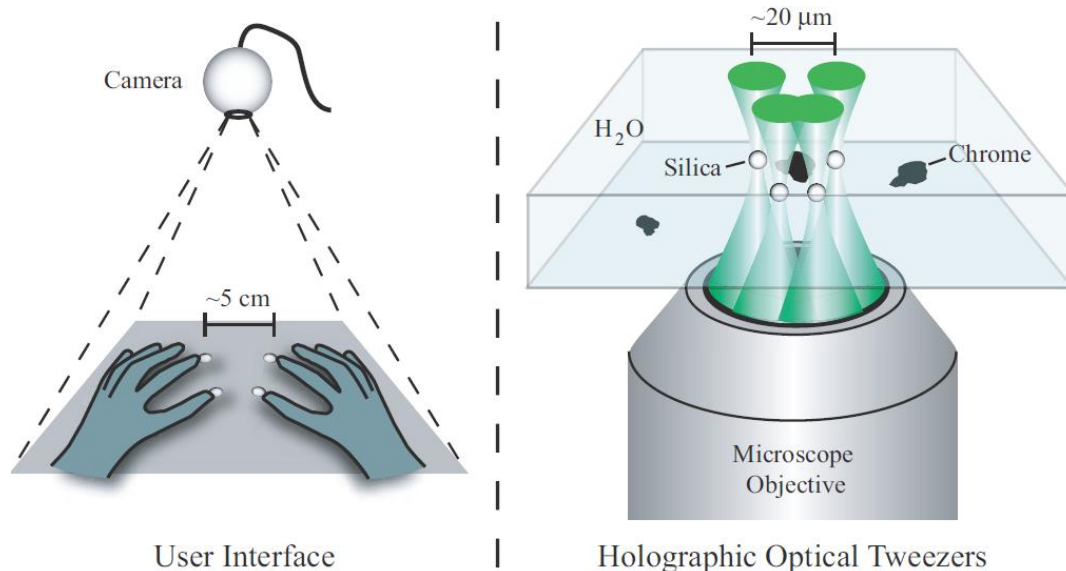
Actuellement, une touche de clavier ne mesure pas l'intensité de l'effort qu'on y exerce, ni la fréquence ou l'attaque des appuis, alors que bien souvent ceux-ci reflètent l'humeur ou l'empressement... quelle frustration pour un pianiste, séparé de ses dynamiques touches d'ivoire et d'ébène, que de devoir s'installer devant un vulgaire clavier d'ordinateur !

Parvenir à sortir du carcan imposé par le clavier et la souris sera très probablement l'occasion d'employer au mieux les capacités du corps humain pour qu'il communique avec la micro-usine. La « machine humaine » mérite mieux que la centaine de touches discrétisées, binaires, d'un clavier ; avec la parole, l'effort et le mouvement, l'opérateur s'exprime directement et la commande de la micro-usine entre dans l'ère de l'IHM continue.

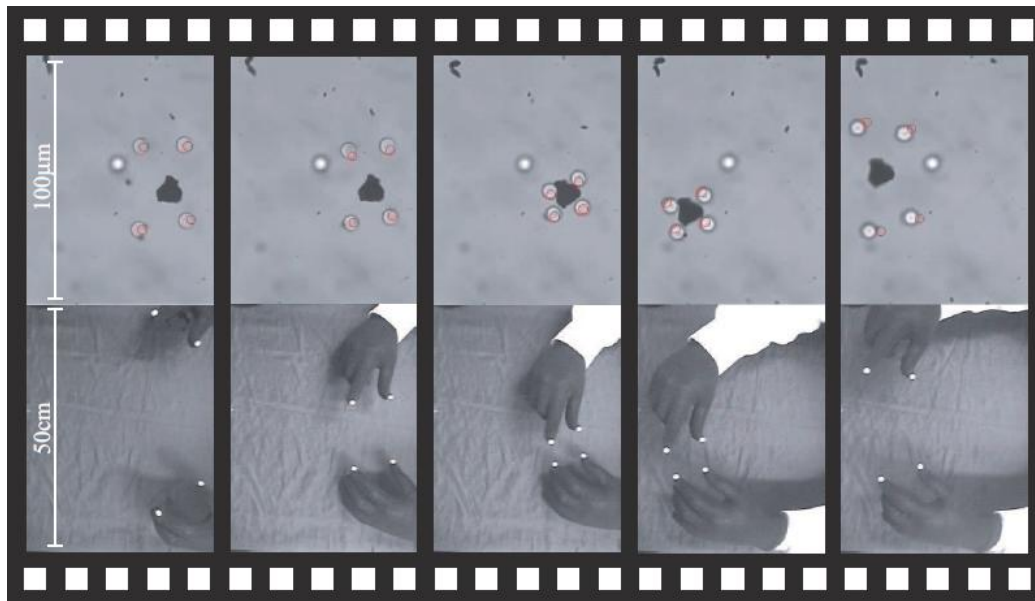
La lecture d'Alain Berthoz [BerA97] nous alerte sur l'importance de l'apprentissage dans le comportement de la formidable machine biologique - humaine et donc animale -. Notre corps ne calcule pas tout en permanence, il reproduit des actions déjà analysées dont il peut anticiper le résultat. Notre locomotion serait nulle sans le développement du sixième sens, en complément aux cinq traditionnellement cités - audition, vision, goût, odorat, toucher -. Notre perception des accélérations et de ce sens de l'équilibre sont indispensables à notre efficacité.

A proximité immédiate de notre laboratoire se trouve l'équipe ERCOS - ERgonomie et COncption des Systèmes - du laboratoire SeT - Systèmes et Transports - de l'UTBM à Belfort-Sévenans. Les travaux entrepris sont appliqués au domaine de l'automobile pour la conception et la production, mais certains équipements développés pourraient servir au contrôle de la micro-usine. Citons, à titre d'exemple, les équipements actuels de ce laboratoire : un système de vision spatiale à triple

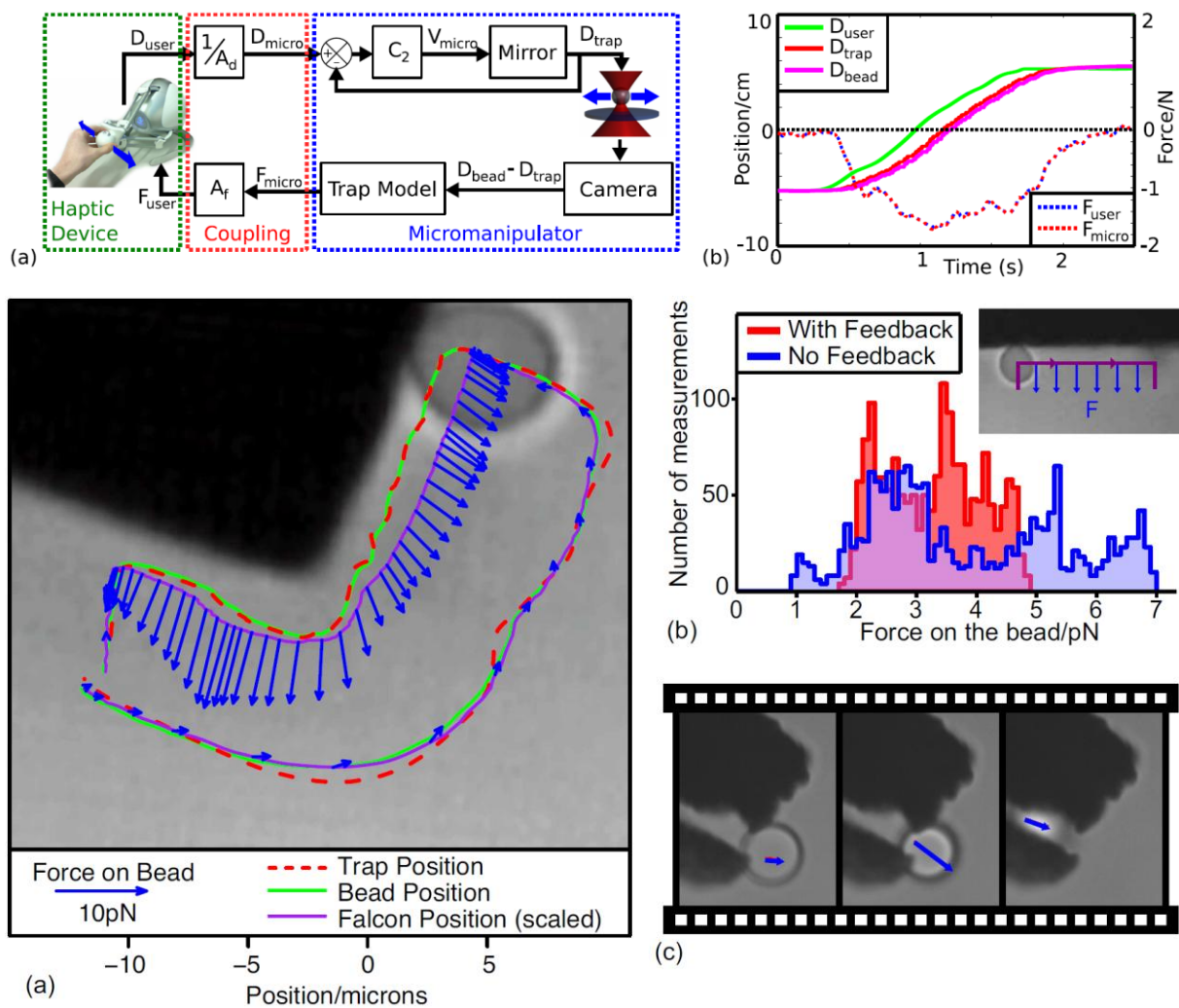
grands écrans, un système de visualisation stéréoscopique, la capture de mouvements, des gants haptiques, la commande vocale, la sonorisation spatialisée. Par ailleurs, nous notons la publication, ces dernières années, de plusieurs travaux sur des technologies ergonomiques appliquées à la micromanipulation, tels que ceux issus de l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotique [Pac09], de l'UPMC-Paris6 et du Laboratoire Interfaces Sensorielles, du CEA LIST - Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies -. Outre-Manche, c'est au Département de Physiques et Astronomie de l'Université de Glasgow que sont développés des travaux de commande haptique par flux de convection induits par un Laser [Why06]. Cette technologie en milieu aqueux est en phase avec le projet PRONOMIA de notre laboratoire.



**3.21 - Schéma de principe de la micropince optique utilisant des flux de convection [Why06]**



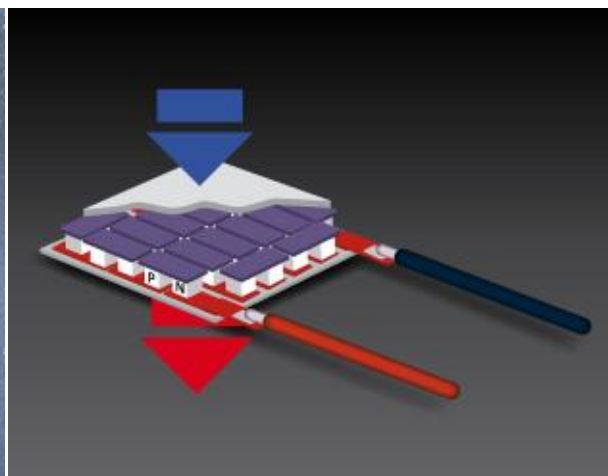
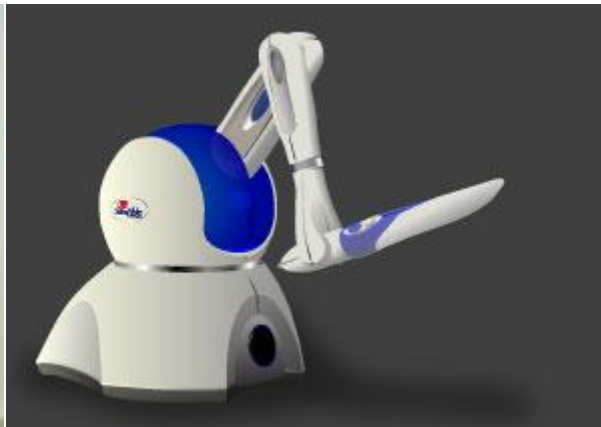
3.22 - Vue d'une séquence de micromanipulation téléopérée par IHM optique



3.23 - IHM haptique à retour de force spatiale sur micro-pince optique [Pac09]

Les travaux d'Aurélien Pocheville au sein du laboratoire IBISC - Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes [[Poc04](#), [Poc06](#), [Poc](#)] - permettent d'appréhender dans sa globalité le domaine de l'haptique. Ce dernier s'intéresse à l'étude d'un sens particulier, celui du toucher. Physiquement, l'interaction d'une main avec un objet s'appuie sur trois perceptions :

- la perception kinesthésique : Elle est relative aux efforts exercés, forces et couples. Notre corps sait reconnaître en temps réel la position et orientation de la main, mais aussi les efforts utiles à la maintenir immobile ou à la déplacer ;
- la perception tactile: via une information de pression de contact sur la peau, elle nous informe sur la texture et le relief de l'objet manipulé ;
- la perception thermique : elle nous procure une sensation de chaleur ou de froid qui nous renseigne sur deux données : d'une part, la température de l'objet relativement à celle de notre peau, d'autre part, la conductivité thermique du matériau qui constitue l'objet - un plastique paraît alors plus chaud qu'un métal -.

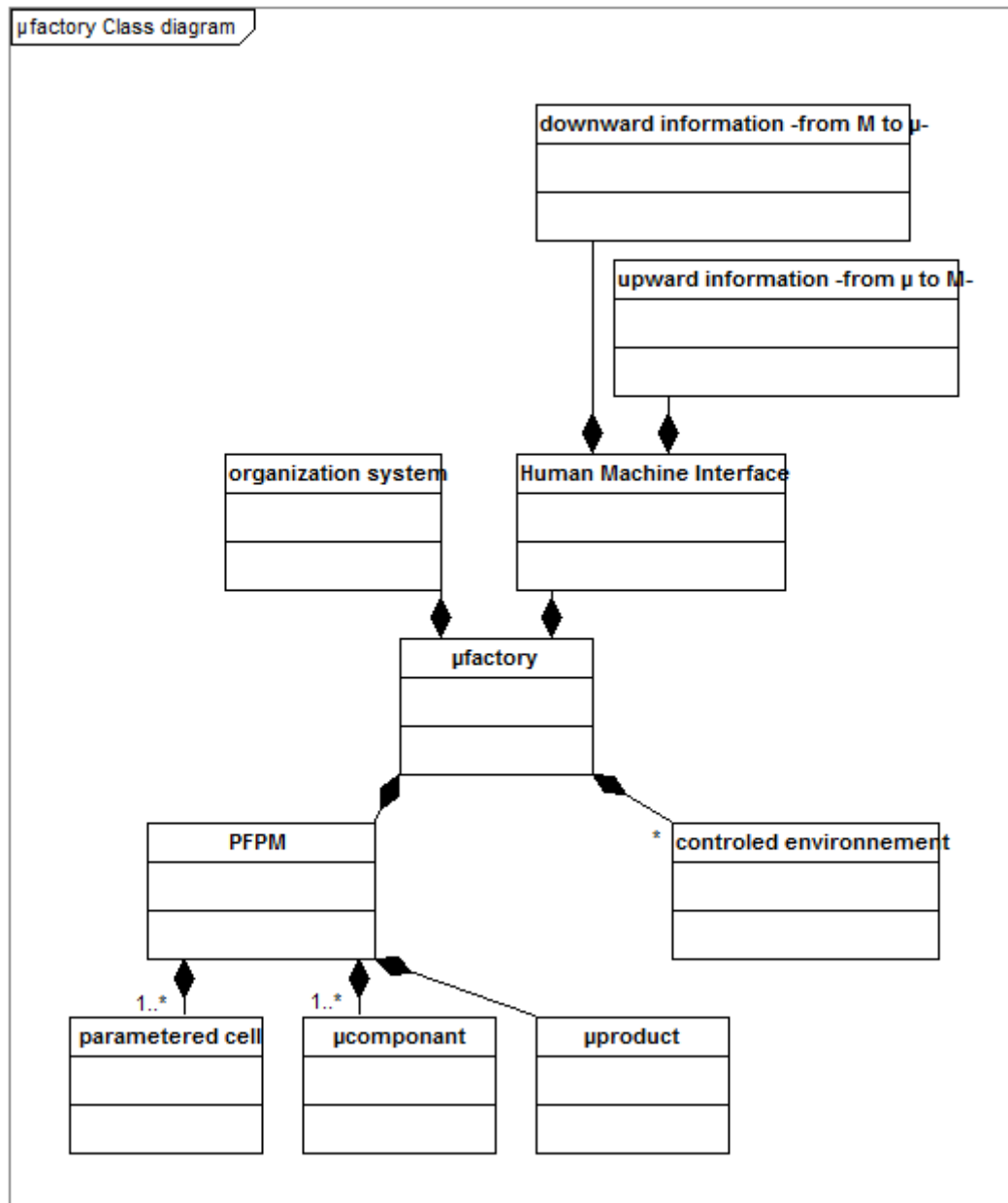


**3.24 - IHM Exemple d'un gant et d'un stylet haptique, zoom sur une matrice tactile - piezoélectrique ou à polymère -, et capteur thermique matriciel à effet Peltier**

Dans notre laboratoire, notre équipe de recherche a initié la mise en œuvre d'une telle Interface Homme-Machine haptique donnant lieu au pupitre de l'AP2M - voir figure 2.58 - Vue d'ensemble de la station de téléopération du projet - et les travaux de transfert tri-focal - voir figure 2.40 - Exemple d'application du transfert trifocal à la micro-manipulation - ou encore de réalité virtuelle augmentée et mosaïcing.

### 3.4.4 La micro-usine

Le recul apporté par l'inventaire mené jusqu'ici des principaux constituants d'une micro-usine nous amène à envisager une modélisation UML à partir d'un diagramme de classes.



3.25 - Diagramme global des classes de la micro-usine

A travers ce diagramme, il est possible d'appréhender la position centrale du « système d'organisation » au premier niveau [Cod02]. Cette position est justifiée car elle met en relation directe quatre classes de niveau 2 : l'interface homme-machine (unique porte d'accès du micromonde à l'opérateur), la télé-opération des cellules



(utilisée en phase d'expérimentation), le pilotage automatique (utilisé en phase de production, autonome, voire de prospection expérimentale), et la base de données des savoir-faire (qui suit en permanence tous les échanges d'information au sein de la micro-usine).

Au cours de la phase de maturité du cycle de vie de la micro-usine, trois flux traversent et relient les constituants définis par les classes du diagramme général.

Tout d'abord, le flux d'information est indispensable à l'échange de données - consignes, mesures, connaissances -. Ces données sont sans cesse en relation avec le micromonde à travers la télé-opération. En revanche, l'IHM est principalement sollicitée lors de la mise en production durant les phases d'apprentissage et d'automatisation. Ce sont ensuite principalement des retours d'information du type alarme, indicateurs de production qui permettent à l'opérateur de garder un œil sur la supervision. Inversement, durant la phase de production, les échanges d'information s'activent du côté du pilotage automatique qui supervise l'obtention des microproduits. Enfin, les données sont relayées en permanence auprès des bases de données de savoir-faire qui centralisent sans cesse de nouvelles connaissances.

Ensuite, le flux de matière d'œuvre, qui, rappelons-le, constitue la finalité même de la micro-usine, concerne en entrée les microcomposants et en sortie les microproduits. Au sein de la micro-usine, ce flux physique de matière transite par la PFPM et les cellules de production.

En dernier lieu, le flux d'énergie alimente principalement chaque micro-actionneur local à une cellule afin de générer les actions, mais aussi l'ensemble de la PFPM lorsqu'elle assure la fonction de transport, stockage des microcomposants et microproduits. Il est pertinent de remarquer que ce flux d'énergie, bien qu'assez faible dans l'absolu, peut fortement varier d'une cellule à l'autre. Lorsqu'il s'agit de manipuler ou assembler un microcomposant - nous entendons par là : transporter, positionner, orienter, maintenir, clipser, etc. -, l'énergie nécessaire à la génération de ces efforts est très faible. En revanche, bien que de courte durée, cette énergie peut être décuplée lorsqu'il s'agit de créer un plasma ou de concentrer un spot laser pour des opérations de micro-ablation ou de microsoudure.

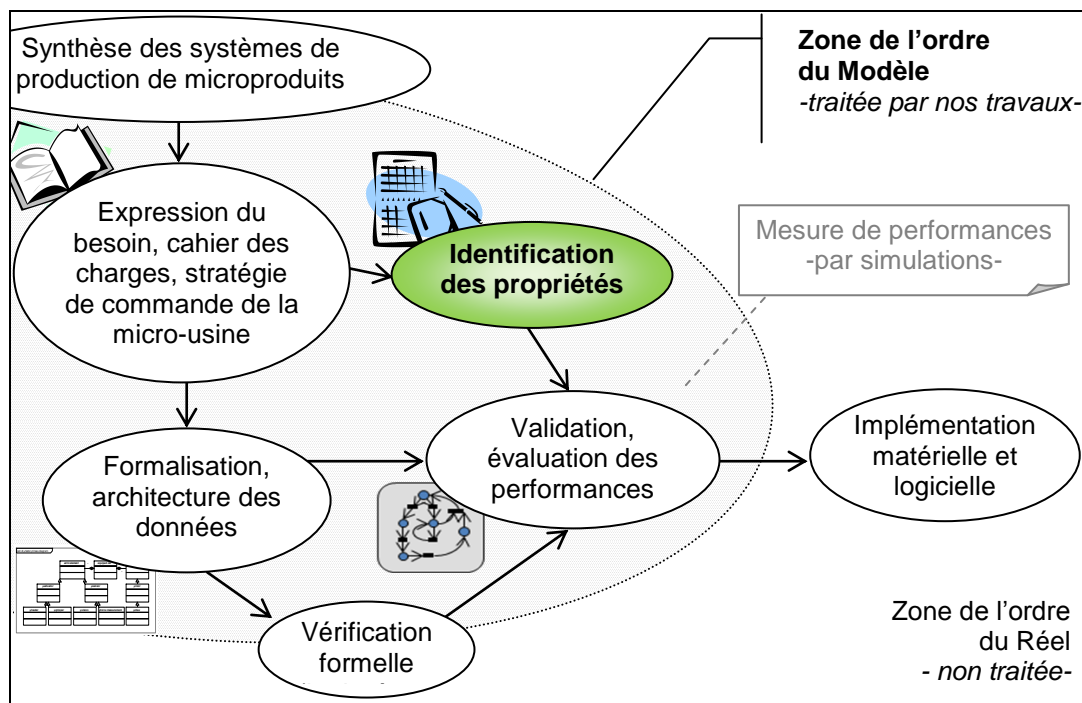
Spontanément, il est confortable de s'imaginer la PFPM matérialisée, par exemple, à travers des connecteurs, des supports de mise et maintien en position, des faisceaux

de câbles ou fibres optiques, mais il est tout aussi envisageable d'avoir à faire à un support non-solide - fluide ou souple, technologie de circuits imprimés flexibles, flex PCB [[Cib](#), [Cir](#), [Par](#)] - dans lequel les cellules seront en lévitation, volant ou flottant à l'image d'un poulpe en pleine mer, ou d'un nuage d'insectes éphémères virevoltant à la surface de l'eau juste après une éclosion. Un tel scénario semble relever de la science-fiction, et pourtant le projet PRONOMIA - détaillé au § 0 - a contribué à immerger le micro-produit pour rejeter les perturbations dues aux efforts capillaires et électrostatiques. L'étape suivante pourrait être l'immersion des cellules de production, voire l'intégralité de la micro-usine. Deux raisons laissent à penser que cette évolution est réaliste. La première concerne la technologie micro-électronique qui, à l'image des nouvelles générations de téléphones portables ou baladeurs MP3, parvient à fonctionner immergée à faible profondeur. La seconde raison rejoint l'évidence lorsqu'on réalise que la biologie n'existe qu'en environnement aqueux ; les formidables machines vivantes se sont développées dans une enveloppe quasi intégralement imperméable : la peau pour les animaux ou l'écorce pour les végétaux. Les cellules biologiques qui donnent naissance à la vie forment un tout s'apparentant aux constituants d'une micro-usine : les neurones et leurs réseaux sont notre base de connaissance et assurent le contrôle-commande ainsi que la supervision, le système nerveux est le support d'information de notre PFPM, le réseau sanguin est le support énergétique de notre PFPM. Les fibres musculaires sont nos micro-actionneurs. La vie est apparue dans les océans, il se pourrait bien que la technologie de la micromanipulation et du micro-assemblage y retourne.

Mais cette extrapolation est encore de l'ordre de l'imaginaire, ce sera peut-être une prospection à venir lorsqu'il sera temps d'aboutir à une intégration extrême. Revenons donc à un exposé cartésien et méthodique.

### 3.5 Critères d'évaluation de la modularité

Ayant présenté la micro-usine - son architecture et ses constituants -, intéressons-nous à établir une liste de critères à remplir pour garantir les propriétés attendues et les évaluer. Cette étape préalable à la validation du modèle - voir la figure suivante de méthodologie -, nous permet un recensement du besoin à satisfaire, une sorte de cahier des charges sommaire puisque sans définition de niveaux, ni de flexibilités. Il est encore tôt pour quantifier de telles grandeurs et la liste ne se veut pas exhaustive par ailleurs.



3.26 - Méthodologie de travail, étape d'identification des propriétés et d'évaluation des critères

Nous développons ici uniquement les propriétés relatives à la notion de cellule et à la PFP. Concernant la micro-usine, nous avons initié la synthèse des propriétés regroupées au sein d'un tableau consultable en annexe [§ 6.1].

Pour établir les critères associés aux propriétés d'une micro-usine, la décomposition en constituants est la suivante :

- un système d'organisation ;
- un système d'Information - flux d'information – ;
- une unité "Plate-Forme de Production de Microproduits" ;
  - o PFPM constituée d'une (ou de) cellule(s) ;
- une (ou des) unité(s) "cellule" ;
  - o chaque cellule constituée d'éléments ;
- des modules matériels élémentaires de type ;
  - o élément(s) actif ;
  - o élément(s) passif ;
- des modules de commandes élémentaires ;
- un (ou des) environnement(s) ;
- un télépilotage & I.H.M.

Relativement à la modularité, nous avons identifié dix-huit propriétés. Les constituants doivent ainsi satisfaire aux caractéristiques permettant de reconfigurer, réorganiser, monter, démonter, modifier, partager, répartir, évoluer pour s'adapter, acquérir des connaissances, accéder à l'information, générer de nouveaux savoir-faire, transférer - flux de microcomposant(s) et de microproduit(s) -, produire, mais aussi être rapide, flexible, accessible matériellement et de qualité.

Dès lors, lorsque ces propriétés sont appliquées à la notion de cellule, il convient d'évaluer les critères suivants :

- le « plug & produce » d'une cellule de base, même si la production reste en partie aléatoire, à la manière des « capteurs intelligents » qui, en plus de fournir une mesure, disposent de fonctions configurables de traitement du signal, d'auto-test et d'auto-contrôle, d'étalonnage automatique, de sortie sur des bus de terrain, etc. ;
- le re-paramétrage, afin de rapidement intégrer un changement de configuration,
- la définition des Entrées-Sorties Information-Energie-Microcomposant lors des expérimentations et lancement de production ;

- 
- l'accessibilité matérielle et la standardisation des interfaces d'information, d'énergie, voire de positionnement mécanique pour monter une cellule sur la PFPM ;
  - le « stop & unplug » afin de rapidement extraire une cellule de la PFPM ;
  - la modularité, re-paramétrable y compris hors reconfiguration et réorganisation, afin de modifier la cellule pour une prospection à venir, voire la recycler et la faire évoluer ;
  - le multi-tâches pour partager une même cellule soit entre plusieurs microcomposants soit entre plusieurs phases d'élaboration du microproduit ;
  - la répartition d'une tâche de fabrication entre plusieurs cellules si elle est dissociable ;
  - l'existence d'une intelligence localement embarquée pour l'acquisition de connaissance, voire le stockage de cette information ;
  - la présence de divers microcapteurs pour permettre l'accès à l'information pour l'opérateur ou plus généralement au système d'organisation ;
  - en cas de distribution hétérarchique de la commande, la curiosité pour faire progresser et générer les savoir-faire ;
  - la synchronisation et la coordination inter-cellules, voire un « sas » en cas d'atmosphère contrôlée, espace tampon de stockage possible pour transférer les micropièces ;
  - l'utilisation d'indicateurs de production afin de suivre et évaluer la productivité ;
  - la connaissance des limites de capacités - e. g. saturation en vitesse, en amplitude de déplacement - des éléments et disposer d'un apprentissage efficace pour travailler aussi rapidement que possible ;
  - la prévision d'une certification qualité notamment pour la traçabilité ;
  - le recours à des constituants matériels démontables voire mobiles ou la présence d'ouvertures pour accéder au cœur de la cellule ;
  - etc.

De même, pour permettre à la PFPM de satisfaire aux propriétés nécessaires à la micro-usine et d'obtenir le « label PFPM », elle doit respecter les critères suivants :

- être « plug & produce » pour pouvoir monter, démonter des cellules et donc être réorganisable ;
- être transportable facilement – e.g. dans un véhicule léger - ;
- autoriser des implantations non permanentes de cellules pour être modifiée ;
- gérer les priorités lors d'un partage de ressources – e.g. un système de transfert ou de vision partagé inter-cellules - ;
- assurer une auto-gestion – e.g. des flux – pour répartir la charge de travail ;
- standardiser et pérenniser l'accueil des cellules – en matériel et en logiciel – pour évoluer ;
- standardiser la gestion de l'information pour y accéder ;
- gérer les flux et les implantations, voire le conditionnement des microcomposants, pour générer de nouveaux savoir-faire ;
- être compatible avec divers conditionnements et assurer un minimum de perte de microcomposants lors des transferts ;
- réduire les durées de transfert improductives car sans réelle valeur ajoutée ;
- privilégier les technologies immatérielles – e.g. sans-fil, vol balistique - pour les échanges d'information, d'énergie, ou de microcomposants et ainsi permettre une accessibilité matérielle.

Ces recensements initient la réflexion à mener pour l'implémentation matérielle et logicielle d'une micro-usine. Ils ont pour vocation de faciliter la définition des méthodes qui, du point de vue de la Programmation Orientée Objet, manipuleront les objets caractérisés par les classes introduites.



### 3.6 Conclusion sur le système d'information de la micro-usine

Après avoir présenté le concept de système d'information, organe central de la micro-usine indispensable à un système d'organisation efficace, nous avons introduit le formalisme de l'outil UML adapté à de telles descriptions. Ces deux notions étaient nécessaires pour caractériser le système d'information de la micro-usine, et définir son architecture. Nous avons tâché de recenser les critères d'évaluation de la modularité quantifiables pour chaque couple (propriété, constituant) et examiné les technologies disponibles – ou en cours de disponibilité - et adaptées aux constituants du système d'information de terrain – pour la PFPM et les cellules - en annexes [6.1 et 6.2].

Il est entendu que ces inventaires ne sont pas exhaustifs puisque l'exploration des propriétés physiques du micromonde n'en est qu'à ses débuts.

Nous ne savons pas, par exemple, « construire » un insecte biologique ou micro-robotique aussi intégré, compact, qu'une simple fourmi, alors que la capacité de calcul d'un ordinateur familial dépasse maintenant largement les connexions neuronales de cet insecte adapté à des tâches collaboratives pour la survie de son espèce. L'intégration de ses organes biologiques reste remarquable et l'équilibre de son fonctionnement flirte avec les nano-sciences - voire au-delà ! -.

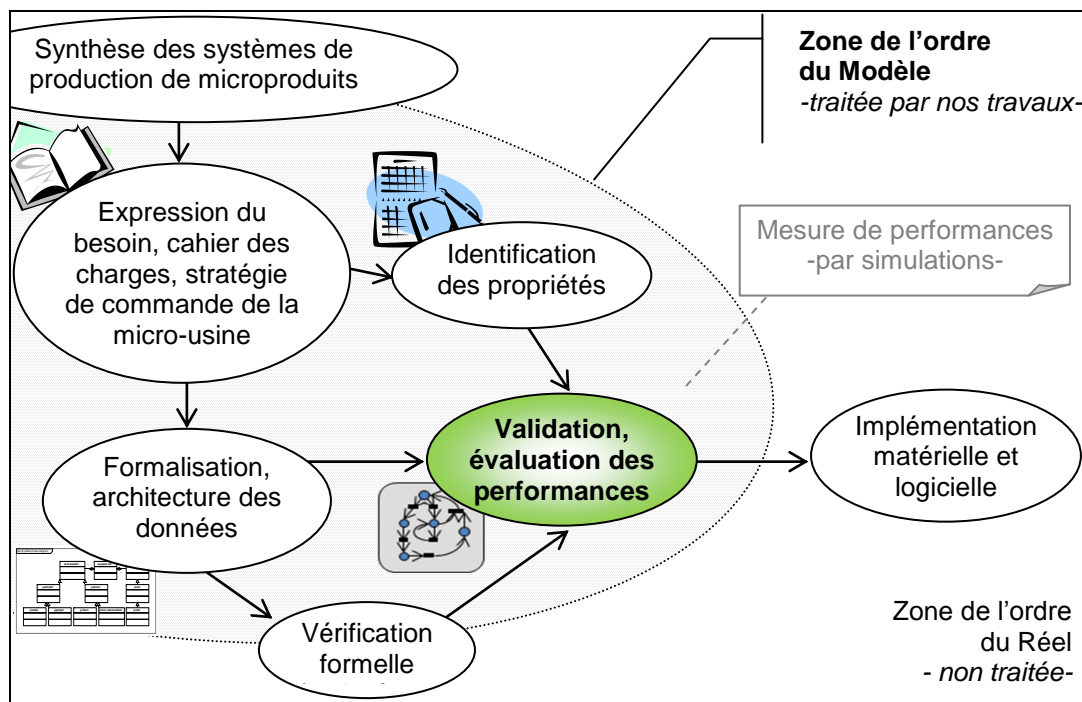
Nous sommes donc contraints à une grande humilité au regard de nos connaissances actuelles.

## 4. Mise en œuvre de la validation du pilotage

Ayant identifié les principaux paramètres intervenant dans la mise en œuvre d'une micro-usine, il faut dorénavant procéder à l'analyse de la dynamique d'évolution de ce système de production, et ce, sans perdre de vue l'environnement d'utilisation. En effet, le contexte principal de modularité est primordial dans le développement du système. Puisque la micro-usine est confrontée successivement à de nouveaux microproduits, le système d'information sera sans cesse amené à perfectionner les connaissances acquises. Les savoir-faire correspondants sont eux aussi potentiellement extensibles à l'infini.

Pour que les simulations de validation soient réalistes, il est primordial d'initialiser le système avec des valeurs aussi proches que possible des actuelles connaissances de micromanipulation et micro-assemblage télé-opérés voire automatisés - aussi rares mais riches soient-elles -. La maîtrise du contexte expérimental va ainsi conduire à définir les conditions initiales de nos simulations de validation.

Dans ce chapitre, nous glissons vers la dernière étape de nos travaux. En reprenant le schéma sur la méthodologie suivie, nous abordons l'étape de validation de la modélisation.



4.1 - Méthodologie de travail, étape de validation

Cette validation consiste à traduire de manière quantifiable les principales propriétés attendues – en termes de connaissance et de durée -, puis à comparer le résultat de simulations par réseau de Petri aux résultats expérimentaux menés au sein du laboratoire et de son homologue Suisse de l'EPFL.

Techniquement, l'outil numérique utilisé est le logiciel de développement PACE, de chez IBE Simulation Engineering GmbH [[pace](#)], qui permet la mise en œuvre de réseaux stochastiques et T-temporisés - le franchissement d'une Transition pondère une variable associée au temps -.

L'aspect stochastique est nécessaire pour ajouter l'indéterminisme du micromonde et se traduit par le réglage d'un paramètre de probabilité lors des tirs des transitions. La progression du réseau peut être personnalisée par une programmation interne à chaque transition en langage Smalltalk. Ce dernier, initié dans les années 1970, est toujours développé. Il est orienté objet et il est réflexif, c'est-à-dire qu'il a la capacité d'examiner, et éventuellement de modifier, ses structures internes de haut niveau - telles que ses objets - lors de son exécution.

Il possède l'avantage d'être dynamiquement typé, autrement dit le type d'une donnée n'est pas associé au symbole de la variable utilisée mais il est encodé dans la donnée elle-même. Cette caractéristique apporte un grand confort de programmation pour celui qui n'est pas expert en POO.

L'expérience acquise ces dernières années en micro-manipulation et micro-assemblage par les acteurs majeurs du Laboratoire Européen Associé Microtechnique - notre laboratoire et l'EPFL - sert de point de départ à nos simulations.

## 4.1 Contexte expérimental

Les simulations de validation de l'architecture des données que nous proposons ici doivent être initialisées par des valeurs réalistes. Pour cela, nous choisissons d'utiliser une analyse des premières manipulations effectuées en télé-opération. Ce retour d'expériences nous a permis l'identification des principaux paramètres : temporels, taux de réussite expérimentale – connaissance, savoir-faire -.

Au sein de l'équipe SAMMI, de nombreuses télé-opérations ont été tentées dans le cadre du projet PRONOMIA - PRincipe et Outils NOuveaux pour le Micro-assemblage Automatisé : une alternative par le milieu liquide - [[Pro05](#), [GauM07c](#)]. La

finalité de ce projet ANR - projet de recherche collaborative entre l'ISIR (Paris) et FEMTO-ST, dont la durée s'est établie entre décembre 2005 et novembre 2008 - était de proposer une



approche innovante à travers la réalisation de tâches de micro-assemblage dans un environnement liquide. L'idée principale était que les multiples effets perturbateurs, relativement aléatoires, sont sensiblement diminués par l'immersion des microcomposants dans de l'eau. Cette approche est nouvelle et permet l'exploration d'une méthode différente de celles qui interviennent habituellement dans l'atmosphère gazeuse terrestre ou sous vide.

A l'issue de ce projet, de nouvelles difficultés sont apparues, liées à l'interface entre l'atmosphère et cet environnement liquide. Nous ne rentrerons pas ici dans ces détails éloignés de notre sujet. En revanche, d'importants progrès ont été réalisés sur plusieurs aspects nous concernant.

Nous retiendrons, d'une manière générale, plusieurs avancées dans les domaines de la vision [[BerJ06](#), [BerJ07](#), [Tam08](#), [Tam09](#)] et de la préhension de micro-objets en milieu liquide [[Low08](#)].

A cet titre, les travaux de David Hériban, ingénieur de recherche CNRS au laboratoire depuis le début du projet PRONOMIA, nous sont doublement utiles : d'une part, ce dernier a, en Programmation Orientée Objet, développé une interface de télé-pilotage modulaire répondant à l'acronyme AP2M pour « Application pour le

Pilotage de MicroManipulations » [\[Hér07\]](#) ; d'autre part, en trois années de travail sur la station télé-opérée PRONOMIA, il a acquis une expérience certaine en micromanipulation et micro-assemblage [\[Gen10\]](#), notamment en atmosphère libre - donc légèrement en marge de la problématique initiale de PRONOMIA -.

Ce sont ses expériences qui servent de base à l'ensemble de nos simulations. La richesse de ses expérimentations, de ses interventions et la diffusion sans réserve de ses acquis ont joué un rôle important dans notre analyse du système d'information adapté à l'évolution d'une micro-usine. Soulignons qu'à travers sa recherche, il s'agissait pour cet ingénieur de communiquer non pas sur la facilité de certaines réussites, mais principalement de faire état de ses difficultés voire de ses échecs. Ces proportions entre réussites et échecs nous sont indispensables pour quantifier le plus justement possible l'initialisation de nos simulations. En effet, sans une telle connaissance de terrain du micromonde au sein du laboratoire, il nous aurait été impossible de maîtriser de tels ordres de grandeurs puisque le micromonde est justement imprévisible pour le commun des scientifiques inhabitué à cette physique hors norme.

Une seconde plateforme de manipulation, appelée SAMMI comme l'équipe de recherche, dont le développement a été initié par Benoît Ballarin et poursuivi par Brahim Tamadazte, nous sert de seconde base expérimentale pour l'approche automatique.

Appréhendons maintenant les rapports d'expérimentations définissant par la suite les conditions initiales à l'extrapolation du comportement d'une micro-fabrication dans une micro-usine simulée grâce aux réseaux de Petri.

#### 4.1.1 Première base expérimentale

Une première base de travail concerne la manipulation et l'assemblage de  $\mu$ -composants de géométrie simple. Les pièces de  $40 \times 40 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^3$  sont fines, plates, d'épaisseur constante et leur contour est globalement carré. Seules quelques encoches profondes, légèrement plus larges que l'épaisseur - en théorie -, taillées sur la tranche des flancs des pièces, permettent la solidarisation des pièces entre-elles.

Mécaniquement, le principe d'assemblage est inspiré du mésomonde. Il consiste à mettre en position grâce à des surfaces de contact complémentaires. Ces surfaces de contact apparaissent lors de l'insertion entre deux encoches pour lesquelles on a pris soin d'introduire un jeu fonctionnel « infime », et donc relativement aléatoire à cette échelle, compte-tenu du procédé de fabrication - succession d'étapes d'épithaxie, résinage, photolithographie et attaques sèches ou humides -. On rencontre ici un premier risque lié à l'incertitude de la largeur de la ou des fente(s) face à l'épaisseur du microcomposant.



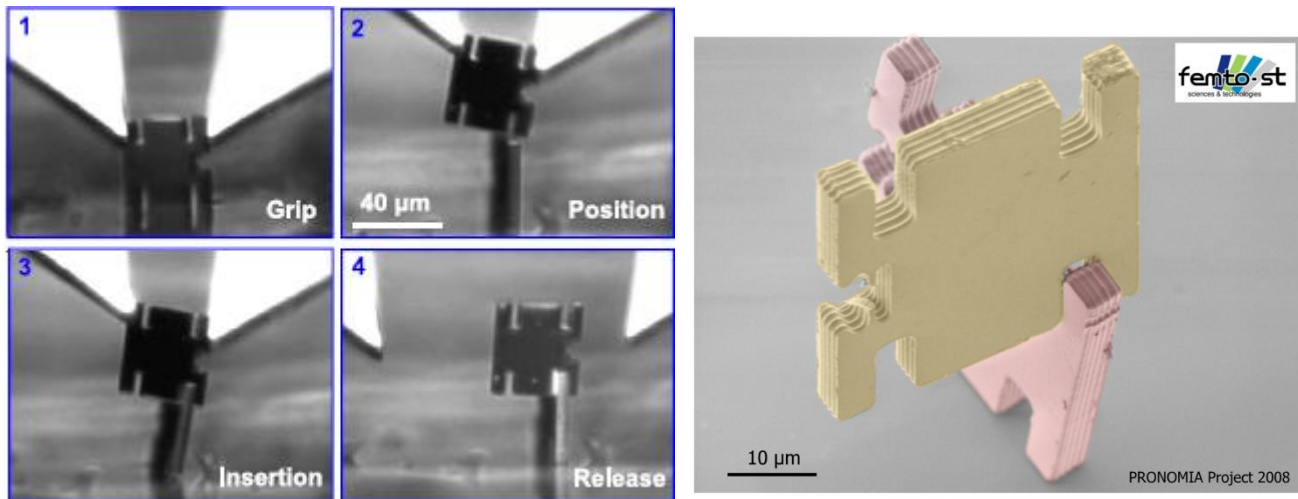
#### 4.2 - Assemblage complet simulé de microcomposants à doubles encoches

En cours d'insertion, la géométrie des surfaces de contact n'autorise globalement qu'un mouvement de translation orienté par l'axe des fentes qui, dans la mesure du possible, doivent être bien alignées. En quelque sorte, nous sommes en présence d'une liaison glissière.

Enfin, lorsque l'insertion fait apparaître un contact entre les fonds des deux encoches, cette butée encastre les microcomposants de façon a priori instable, démontable ; elle est finalement définitive compte-tenu des forces d'adhésion qui apparaissent à travers les multiples contacts.

Nous pourrions effectivement penser que l'assemblage obtenu est instable et risque de se désolidariser compte-tenu d'un arrêt uniquement unidirectionnel au fond des encoches. Mais ne perdons pas de vue qu'à cette échelle, les masses deviennent négligeables au regard des efforts surfaciques et, de ce fait, la réversibilité du

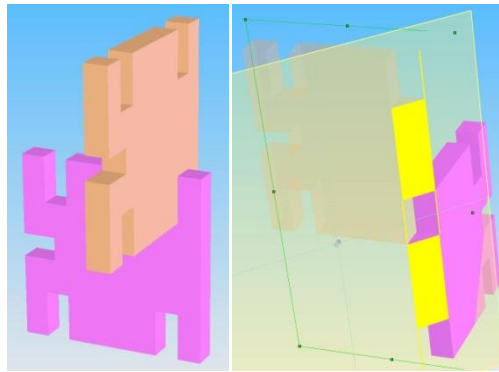
mouvement dans cette liaison glissière n'est pas effective. Selon la qualité de la réalisation des surfaces ici fonctionnelles et de l'ajustement – jeu - en présence, les efforts surfaciques de contact limitent la qualité de l'assemblage ; les frottements responsables sont probablement dûs aux forces de serrage, capillaires et de Van-der-Waals. L'image suivante d'un tel micro-assemblage obtenu sur une station de notre laboratoire illustre mes propos puisque l'on observe une liaison mécanique dite « complète » bien que l'insertion, elle, soit incomplète. A ce titre, nous pouvons observer que l'insertion a abouti jusqu'à ce que le fond d'une entaille interfère avec le bord de l'autre microcomposant, diminuant ainsi de moitié l'emboîtement, mais surtout réalisant un micro-assemblage sans être réellement en présence de surfaces géométriquement complémentaires - comme cela est le cas dans le mésomonde -.



**4.3 - Assemblage expérimental incomplet de doubles encoches**

L'observation en coupe de la modélisation nous amène à découvrir, compte-tenu de la cavité ainsi créée, la mise en correspondance de huit arêtes dans cet assemblage. Nous pouvons donc envisager plusieurs hypothèses : soit des forces de type électrostatiques maintiennent l'équilibre de ce micro-assemblage grâce à des charges accumulées sur les arêtes, soit l'humidité ambiante crée des efforts dûs aux tensions de surface, soit la micro-tribologie causée par un serrage dû à un jeu fonctionnel négatif assure une adhérence.





#### 4.4 – Simulation d'assemblage rigide bien qu'incomplet de doubles encoches

Soulignons également que, lors de l'insertion, le frottement avec glissement entre les pièces au niveau des arêtes, induit l'apparition des charges électrostatiques.

Pour parvenir à l'assemblage par encoches de deux microcomposants, il a fallu monter en compétences sur :

- les actionneurs susceptibles de générer des déplacements micrométriques avec des forces de quelques microNewton,
- le système de contrôle commande de ces actionneurs,
- le profil des surfaces du préhenseur amenées au contact : des constituants interchangeables, appelés organes terminaux, étant fixés sur les actionneurs,
- le support amené à recueillir les microcomposants orientés, puis l'assemblage ; ce support est un plan possédant de grandes propriétés d'adhérence,
- la chaîne d'information permettant le retour d'informations visuelles par une à trois caméras et leur optique à fort zoom - mais faible profondeur de champ -.

Finalement, nous observons que la mise en œuvre de tels équipements requiert beaucoup de temps pour leur développement - se compte en années -, leur intégration - se compte en semaines voire en mois -, leurs réglages - se compte en heures voire en jours -.

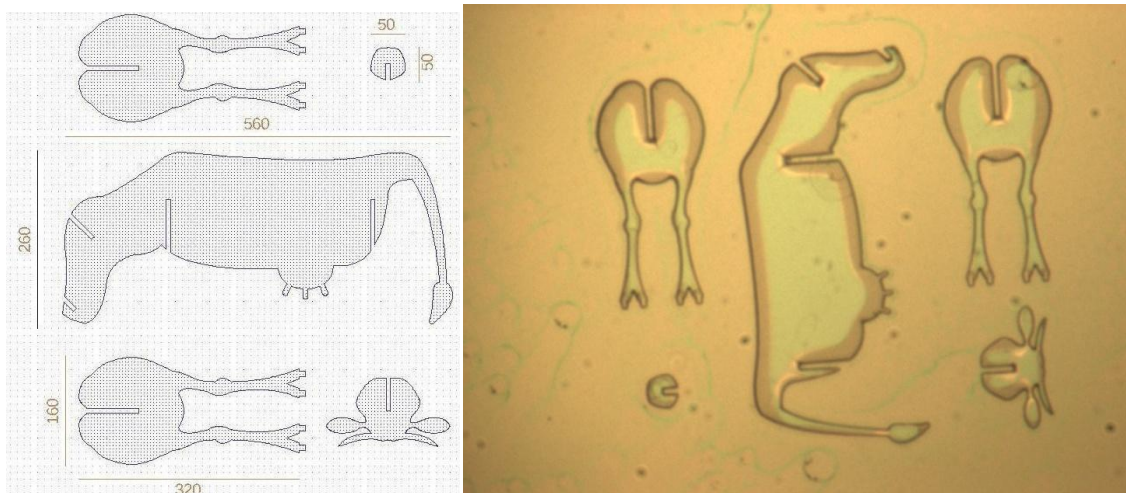
Une fois la station de télé-opération fonctionnelle, les manipulations sont très lentes – par crainte de casse des organes terminaux -, les accélérations importantes conduisent à des pertes de pièces qui sortent du champ de vision. La dépose devient aléatoire car les microcomposants « collent » aux doigts de la pince. Pour parvenir à manipuler correctement un microcomposant, il faut souvent s'y prendre en plusieurs fois ; il n'est pas rare de devoir procéder à une dizaine de tentatives pour une réussite.

L'aboutissement plutôt spectaculaire de cette approche a été, à l'automne 2008, le micro-assemblage de cinq microcomposants.

Plusieurs prouesses sont à mettre à l'honneur de cette première mondiale :

- la taille des pièces :
  - Diversité des dimensions - en surface, la plus petite mesure le soixantième de la plus grande - ;
  - Faible épaisseur de 5  $\mu\text{m}$  ;
- leur nombre, puisque ce sont quatre microcomposants qui ont pris place sur un cinquième ;
- des insertions bidirectionnelles sur une même pièce nécessitant un retournement ;
- des insertions en oblique, à 45° ;
- des chaînes cinématiquement fermées et ouvertes ;
- la stabilité du positionnement hyperstatique sur quatre pieds ;
- un temps d'assemblage record ; réalisé en à peine moins d'**une heure**, en incluant les prises de pièces qu'il fallait désolidariser de leur substrat.

Soulignons enfin que ce micro-assemblage a été l'objet d'un prix à l'occasion du salon industriel et scientifique Micronora 2008, puisqu'un micron d'or a été décerné à l'équipe qui a travaillé sur la station de télé-opération du projet Pronomia.



**4.5 – Aperçu des microcomposants à assembler pour Micronora, en clin d'œil régional**

### **Rapport d'interview et analyse de la démarche de micromanipulation, micro-assemblage :**

Les principales caractéristiques de ces micromanipulations suivies de micro-assemblages, décrites par D. Hériban, font apparaître les informations suivantes sur l'aspect principal d'une telle opération, à savoir réussir ou échouer :

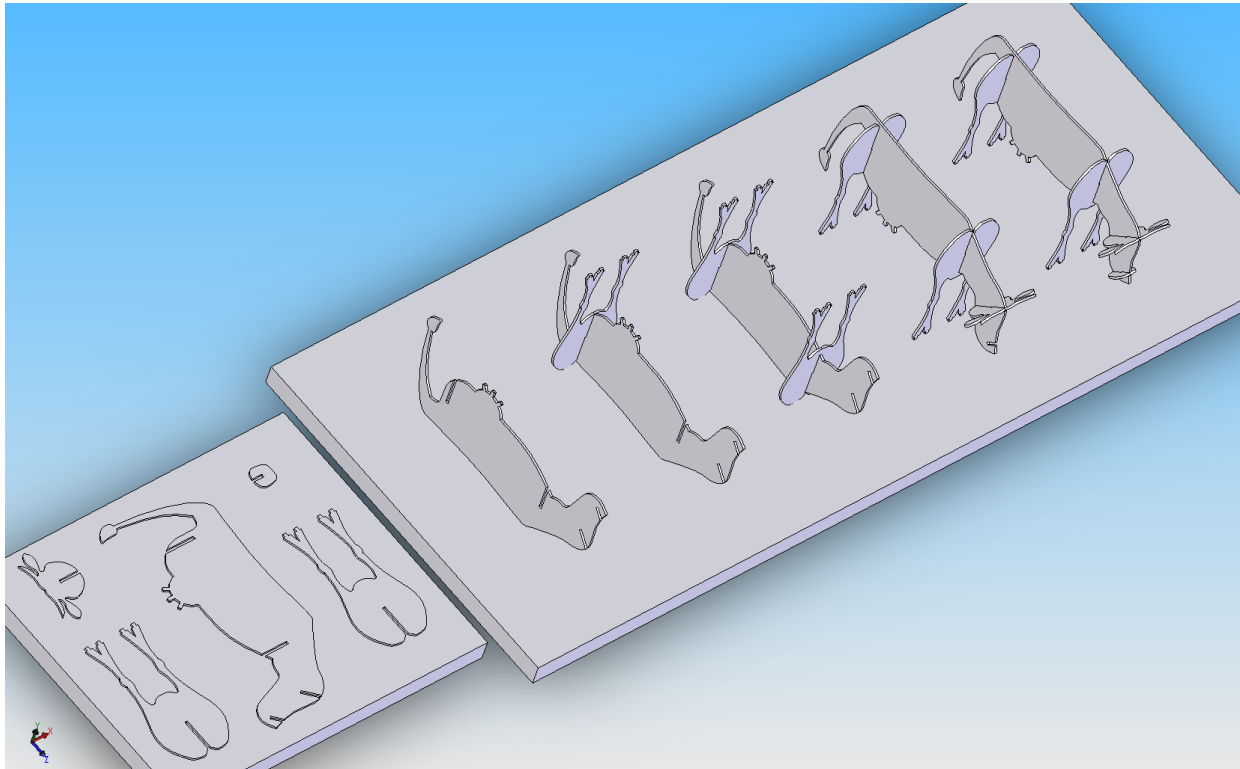
#### **- Réussite, échec, aléas micromonde, savoir-faire :**

La première partie de cette analyse permet de rapporter les principales données relatives à la micromanipulation et au micro-assemblage, vues à travers le filtre de la notion de réussite/échec. Les échecs provenant de l'apparition de phénomènes aléatoires imputables à la physique complexe du micromonde, leur inventaire aide au développement et à l'acquisition de nouveaux savoir-faire.

Pour parvenir à manipuler de tels microcomposants, il faut tout d'abord les séparer du substrat duquel ils sont solidaires. Les premiers essais pour décoller les microcomposants sont relativement médiocres puisqu'on compte en moyenne dix échecs pour une réussite. Les causes des échecs sont en général la casse de la pièce ou sa perte car elle saute au-delà du champ de vision des caméras. Puis, l'originalité du contexte liquide de PRONOMIA est intervenue pour permettre une impressionnante progression. En effet, dès lors que l'idée est apparue d'humidifier le contact entre les pièces à séparer, les proportions d'échecs ont fortement régressé avec **un rapport moyen de deux échecs pour une réussite**. Ainsi, l'usage d'alcool pour humidifier le contact entre les objets à séparer permet de passer d'un contexte d'efforts surfaciques de type Van der Waals à des efforts capillaires moindres, bien qu'augmentant le frottement de type visqueux. L'avantage dans l'utilisation de l'alcool concerne, notamment, son aptitude à s'évaporer relativement rapidement puisque, après séparation, le liquide disparaît de la surface en une trentaine de secondes.

Cette première étape de préhension du microcomposant est indispensable, et de penser à un tel artifice d'humidification de l'interface a fortement amélioré le comportement.

Après séparation du substrat, l'opération suivante consiste à transporter le microcomposant vers la zone d'assemblage en modifiant l'orientation de la pièce puis selon un cycle en U traditionnel dans les automatismes - montée, déplacement latéral, descente -. L'illustration suivante permet d'observer ces opérations et leur séquencement :



#### **4.6- Micro-composants de la microvache et séquencement des opérations de micro-assemblage**

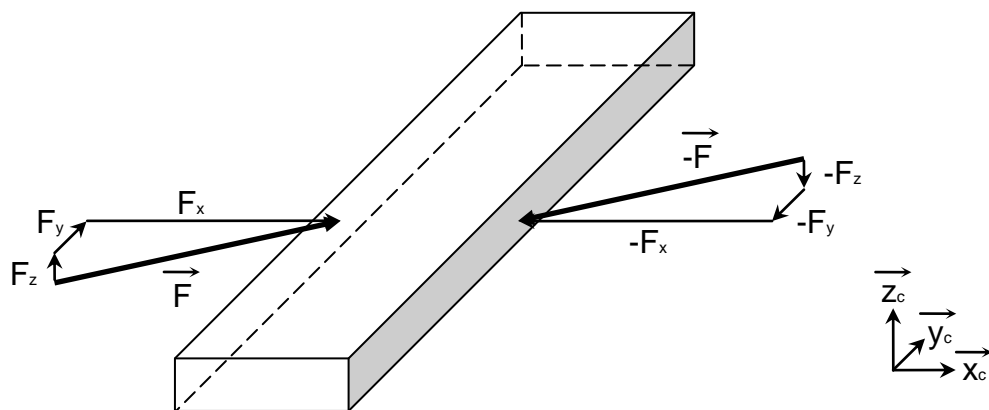
Les pièces étant par la suite assemblées par insertion entre les fentes précédemment décrites, et ne disposant que d'une unique micropince pour l'ensemble de la station, il s'agit de déposer le premier microcomposant afin de saisir le second. Dès lors, deux stratégies sont maîtrisées par notre laboratoire. La première consiste à appuyer la pièce positionnée sur la tranche contre un bloc parallélépipédique de Silicium, ce qui participe à la « Mise en position » de la pièce, démarche issue des méthodes usuelles en mécanique. La seconde solution habituellement utilisée revient à effectuer une sorte de « Maintien en position », lui aussi issu des méthodes du génie mécanique, par l'intermédiaire d'un « gel pack ». Cette substance déposée en surface de la zone d'assemblage crée une adhésion du microcomposant qui peut ainsi être lâché en toute confiance, sans crainte qu'il ne s'égaré en disparaissant du champ d'observation des diverses caméras.

Pour parvenir à assembler le second microcomposant, il est indispensable d'orienter la fente d'insertion du premier microcomposant, de sorte à pouvoir y glisser le

second. Or, lors du micro-assemblage, seul le second microcomposant est maintenu par la micropince. Il s'agit donc d'orienter le premier microcomposant perpendiculairement à la surface de la zone de travail. Dans le mésomonde cette position serait un équilibre instable mais à l'échelle micro le faible volume et donc la masse négligeable autorise l'idée de poser une pièce sur sa tranche.

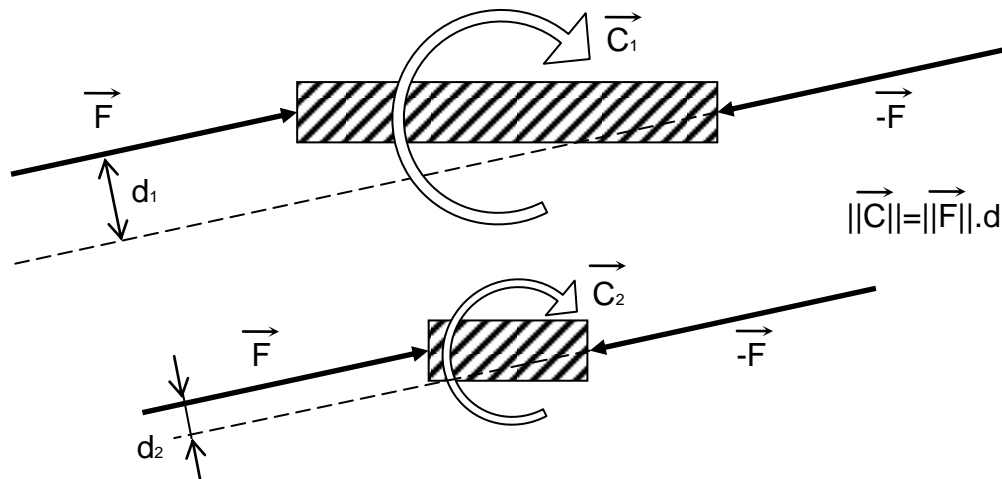
Ce changement d'orientation entre la prise de la pièce, à l'occasion de sa séparation du substrat, et sa dépose sur la zone d'assemblage est source d'un nouveau savoir-faire. Après avoir glissé les doigts de la micropince sous le microcomposant pour le décoller du substrat, il s'agit de le saisir par pincement entre deux bords opposés. Pour une évidente question de stabilité de cette préhension, celle-ci s'effectue toujours par un serrage entre les deux côtés les moins éloignés.

Petit rappel mécanique : tout d'abord, un paramétrage minimal s'impose, soit  $(x_c, y_c, z_c)$  une base liée au microcomposant telle que  $z_c$  soit orientée selon la faible épaisseur de la pièce.



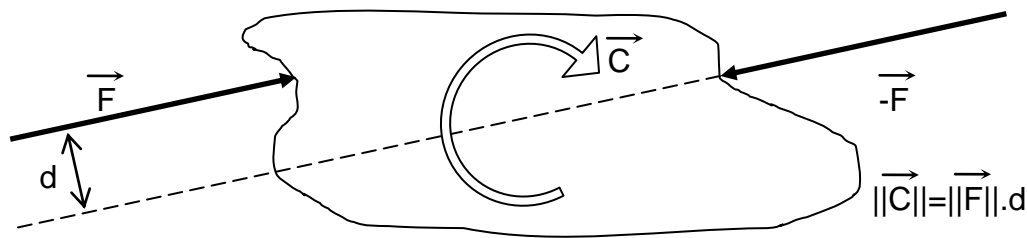
#### 4.7 - Apparition d'un couple de basculement

Lorsqu'un objet est en équilibre sous l'action de deux forces en compression, d'orientation principale selon  $x_c$ , alors, pour un défaut d'alignement donné de ces deux forces dont la composante selon  $z_c$  serait non nulle, un couple de basculement apparaît, selon  $y_c$  avec le paramétrage choisi ; il est d'amplitude d'autant plus grande que les forces sont distantes, comme le confirme l'illustration de la figure suivante.



4.8 - Couple de basculement dépendant de la largeur

Une autre particularité apparaît avec les pièces de ce record historique d'assemblage de la microvache. Nous observons en effet que le contour des pièces n'est pas linéaire, ni discrétisé par des successions de segments rectilignes, mais il est arrondi en comportant des portions concaves et d'autres convexes dans le plan  $(x_c, y_c)$ . Ici également, la saisie est d'autant plus stable que les appuis ponctuels des extrémités des doigts de la micropince sont choisis au point de courbure maximale des bords concaves. Idéalement, les droites normales à la courbe du contour en chacun de deux points de serrage sont également confondues, afin de ne pas créer de couple équivalent de basculement. A ce titre, deux courbures sur des bords opposés, dont les normales ne seraient pas confondues induisent des composantes de force selon  $y_c$ , qui, en s'opposant l'une à l'autre, créent un couple selon  $z_c$  lequel induit une rotation du composant dans le plan  $(x_c, y_c)$ . Cette rotation est très vive car la pièce ayant très peu de moment d'inertie elle subit une d'autant plus d'accélération en rotation. Voici l'illustration du couple équivalent :



**4.9 - Couple équivalent induisant une rotation –accélération angulaire-**

La description précédente de la manipulation de prise de microcomposant fait apparaître une contradiction dans les étapes de « saisie-dépose » liée à l'orientation finale sur le gel-pack<sup>6</sup> différente de celle sur le substrat de fabrication. Etant donné les difficultés déjà rencontrées pour extraire le microcomposant de la surface du substrat, il n'est pas pensable de déposer ensuite ce microcomposant directement à plat sur la surface adhésive du gel-pack, d'autant plus qu'il est ensuite nécessaire d'orienter les fentes d'insertion - et donc le microcomposant - dans un plan vertical à la surface de la zone de dépose. En conséquence, le microcomposant doit être réorienté par une rotation de 90° de sorte à être déposé sur la tranche. Dès lors, la prise idéale, y compris pour assurer un transport, avec un minimum de risque de perte de microcomposant, consisterait à pincer le microcomposant dans le sens de son épaisseur ; les doigts seraient orientés selon  $z_c$ . Cela est impossible au début du mouvement puisque le microcomposant est à plat sur un substrat, et, bien que l'on puisse glisser un doigt sous le microcomposant, on ne peut orienter ce dernier perpendiculairement à la surface. On le voit ici, la description de cette contradiction peut ouvrir quelques pistes de solutions : la première consiste à pré-orienter le substrat dans un plan vertical plutôt qu'horizontalement, et, idéalement, une entaille dans le substrat sous le microcomposant créerait un dégagement utile au placement d'un doigt de la micropince pour saisir la pièce selon son axe  $z_c$ .

Mais la solution technique adoptée est toute autre. Le téléopérateur a choisi de profiter de l'importante adhérence disponible sur le gel-pack. Ainsi, le microcomposant est couché, puis poussé par un doigt de la micropince par appui sur le bord comportant les encoches à assembler de sorte que le bord opposé adhère sur le gel-pack et accroche suffisamment pour permettre une rotation par le principe de basculement.

<sup>6</sup> Il s'agit de la surface de travail recouverte d'un revêtement à forte adhésion (de type capillaire).



Lors de cette orientation, il se produit de l'ordre de une à trois chutes – échecs - pour parvenir à une orientation réussie.

Ensuite, les premières insertions, bien qu'orientées verticalement, ont échoué pour près de 80% lors des essais en raison d'un manque d'informations visuelles. Non seulement la focalisation n'était pas suffisante, mais il manquait également une vue pour appréhender correctement la géométrie spatiale de l'insertion. En effet, le mouvement final de translation n'est que la partie émergée de l'iceberg, puisqu'il nécessite de la précision sur cinq paramètres : deux de position pour aligner les « entrées » des fentes, puis trois d'orientations - angles d'Euler - pour aligner les surfaces planes devant s'emboîter. Il est également important de prendre la mesure de la relative qualité de la vision à cette échelle ; la transparence des pièces fines de 5  $\mu\text{m}$ , les reflets qui donnent l'illusion de mirages et la faible profondeur de champ des optiques fournissent au final un rendu assez médiocre mais nécessaire à la connaissance du micromonde. L'amélioration des difficultés optiques et la résolution de l'absence d'une vue par ajout d'une caméra a permis d'inverser le rapport de proportionnalité des échecs en comparaison aux réussites en passant à 75 % d'insertion abouties.

Une autre illustration de l'imagination dont il faut faire preuve lors de telles micromanipulations concerne la phase d'orientation de la partie formant la tête de la microvache avec cornes et oreilles. Pour parvenir à insérer ce microcomposant - après avoir mis la bête sur ses pattes -, il était nécessaire d'orienter son plan principal parallèlement à l'encoche, elle-même inclinée à 45°. Ainsi, le téléopérateur a choisi de profiter de la relative mobilité en rotation qui subsiste entre les deux doigts de la pince et le microcomposant. Si l'on considère qu'à leur contact, une importante force ponctuelle avec frottement est générée, donc susceptible de s'incliner par rapport à la normale au plan tangent du contact ; cette dernière peut donc finalement être modélisée comme une liaison rotule tant qu'elle ne glisse pas. La modélisation par deux rotules du pincement induit une liaison pivot libre de tourner autour d'un axe passant par les deux points d'application des forces ponctuelles. La liberté de la mobilité de cette liaison est tout de même relative car les quelques frottements et efforts du micromonde en présence suffisent à immobiliser ce degré de liberté. Cependant, en choisissant de prendre appui avec ce microcomposant « tête » sur le museau du corps de la microvache, en un point excentré de l'axe de la liaison pivot induite par le pincement, le téléopérateur parvient

ensuite assez aisément à modifier l'inclinaison du microcomposant pour l'amener aux 45° nécessaires pour l'insertion du micro-assemblage.

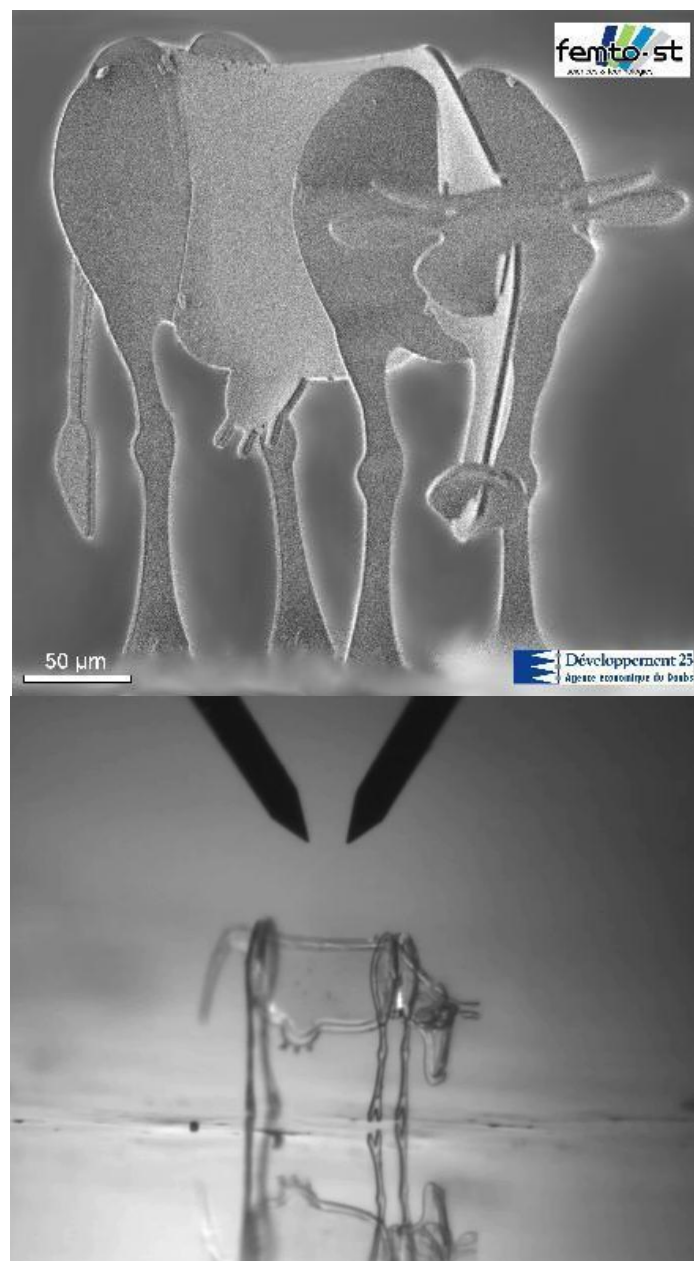
A première vue, cette démarche particulière donne ici au micro-sous-assemblage une fonction outillage, dont l'effet pourrait s'avérer dévastateur compte-tenu des efforts encaissés inutiles à son propre assemblage. En revanche, cette astuce possède un avantage indiscutable puisqu'elle évite d'avoir à introduire un micro-outillage - de type élément passif, en référence à la schématisation UML - spécifique à cette opération. Il aurait par ailleurs l'inconvénient non négligeable d'encombrer la zone d'assemblage et d'ainsi perturber les retours par imagerie indispensable à la télé-opération.

Un peu de rétro-ingénierie nous amène à noter que certaines surfaces - face, bord, arête, sommet - de microcomposants, sans fonctions techniques initiales, peuvent être recensées et dessinées de sorte à optimiser de telles opérations. Par exemple, sur la tranche de la pièce, une encoche assez peu profonde - concave et de grande courbure - permet le blocage d'un point du microcomposant à réorienter, en lui imposant son CIR - centre instantané de rotation -.

Au sujet de l'insertion à 45°, une autre observation est à inscrire à l'inventaire des savoir-faire issus de la fabrication de la microvache. Contrairement à l'évidence trompeuse que l'on pourrait penser de ce micro-assemblage par insertion entre deux fentes inclinées à 45°, le mouvement donné à la pièce mobile par les doigts de la pince en déplacement est en fait une succession alternée de pas sur les directions horizontale et verticale. Bien que l'interface de pilotage AP2M permette, par la synchronisation des deux déplacements correspondants aux mobilités initiales de la station, la définition d'un « axe virtuel » - qui serait justement incliné par exemple de 45° -, il n'a pas été nécessaire d'utiliser cet artifice. Le résultat de l'insertion est largement satisfaisant avec une technique d'alternance de mouvements conjugués. Dans le contexte actuel de production en très faible série, quasi-unitaire, cette stratégie a l'avantage d'économiser le temps qu'il aurait été nécessaire de consacrer à la configuration de cet axe virtuel.

Le temps, ou plutôt la durée d'une opération, est un nouveau paramètre à prendre en compte dans le contexte de la micro-usine. Faisons le point sur les ordres de grandeur des connaissances acquises par notre laboratoire à ce sujet compte-tenu de sa relativement bonne expérience de la micromanipulation et du micro-assemblage.

Auparavant, il est temps de concrétiser le résultat de cet assemblage ; pour le plaisir des yeux, pour l'originalité de la démarche, envers la Région Franche-Comté et la race bovine montbéliarde - dont on doit la reconnaissance à M. Jules Viette -, voici Miss Maghi - pour **Micro-AssemblaGe** d'un **HerbIvore** -.



4.10 - Vue MEB et microscope de la microvache assemblée -  $0,16 \times 0,32 \times 0,56 \text{ mm}^3$  ep  $5 \text{ }\mu\text{m}$  -

- **Durée, temps, pénalisation, accroissement du savoir-faire :**

Il faut compter entre une et deux minutes pour libérer un microcomposant du substrat. La durée de l'opération est globalement la même avec ou sans humidification de l'interface à l'alcool. En revanche, il y a près de 80 % d'échec en moins avec l'usage de l'alcool qui, c'est le revers de la médaille, pénalise le chronomètre car, à l'issue, il faut attendre de l'ordre de trente secondes que le liquide s'évapore en surface.

Une autre durée caractéristique concerne le délai pour parvenir à basculer le corps de la microvache à la verticale. Cette opération requiert en moyenne une minute pour une réussite, sachant qu'il se produit de l'ordre d'une à trois chutes - échecs - pour parvenir à une orientation réussie : **taux moyen de réussite de 33 %**.

La phase de micro-assemblage par insertion a connu une réduction remarquable de la durée de son opération : les premières tentatives ont requis une dizaine de minutes, alors qu'il ne fallut plus qu'une à deux minutes, une fois résolue la difficulté liée à la vision et à la qualité de ce retour d'information.

Attention cependant car l'ajout d'une caméra n'est pas une opération anodine. Non seulement l'optique est très encombrant étant donné les distances focales importantes à cette échelle, mais un tel changement dans la structure matérielle de la station de téléopération est à classer au rang de la réorganisation.

Ici, cette réorganisation ne pénalise pas beaucoup la mise en service de la production car elle n'a nécessité qu'une trentaine de minutes. Mais la durée requise pour une telle décision de réorganisation peut rapidement croître. Il faut, à titre d'exemple, compter entre une demi-journée et trois jours de travail si le codage d'un fichier source est à modifier. Ce peut être également une tâche de plus grande envergure durant une à trois années d'un doctorat si les équipements - matériels ou logiciels - indispensables au nouveau scénario doivent être développés.

Les actuels travaux menés par l'équipe SAMMI pour le développement de nouveaux capteurs de microforces, microactionneurs, microrobots, asservissements visuels, lois de commande en sont une concrète illustration - linéarisation, Hystérésis, vue virtuelle évitant l'encombrement d'une caméra supplémentaire et son optique -.

#### 4.1.1.1 Synthèse des taux de réussite et des durées expérimentales

Les ordres de grandeur relatifs à la fabrication par assemblage de la microvache menée par David Hériban sont résumés dans le tableau suivant :

opérations de manipulation et d'assemblage	taux de réussite			durée			remarques
	maxi	moy	mini	maxi	moy	mini	
orientation par rotation due au basculement consécutif à une poussée et à une adhérence sur le bord opposé	50		25	2'		15s /manuel 2s / autom.	1 réussite pour 1 à 3 chutes (échecs)
insertion en orientation verticale mais manque d'informations visuelles (focalisation insuffisante et manque d'une vue pour géométrie spatiale)		20			10'		
insertion en orientation verticale avec informations visuelles (ajout d'une vue par une caméra supplémentaire)		75		2'	1'30s	1'	
réorganisation avec une caméra supplémentaire					30'		
réorganisation / modification d'un fichier source				3 j		1/2 j	
réorganisation / développement d'équipements (matériels, logiciels)				3 an		1 an	
libération d'un composant du substrat sans alcool		20		2'		1'	
libération d'un composant du substrat avec alcool		85		2'30"		1'30s	80% d'échec en moins ( $0,8*0,8=0,64..+0,2$ )
durée d'évaporation de l'alcool		100			30s		
basculement à la verticale	50		25		1'		
Assemblage des 5 microcomposants		100			1 h		

Pour mémoire :

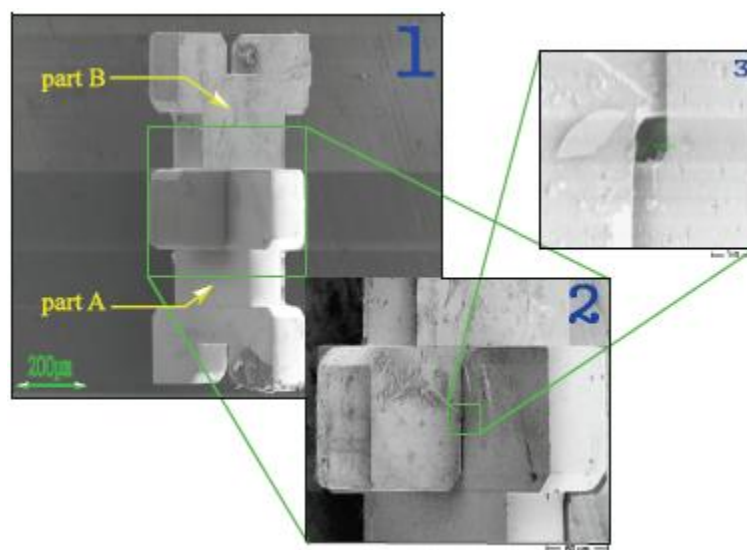
assemblage de quatre composants sur un cinquième	corps	pattes	tête	museau
taille des pièces d'épaisseur 5 µm	260*560	160*320	100*150	50*50
diversité des dimensions (ratio)	1/112	1/64	1/30	1/10
insertions bidirectionnelles avec retournement		oui		
insertions verticales et obliques à 45°			oui	oui

#### 4.1.2 Deuxième base expérimentale

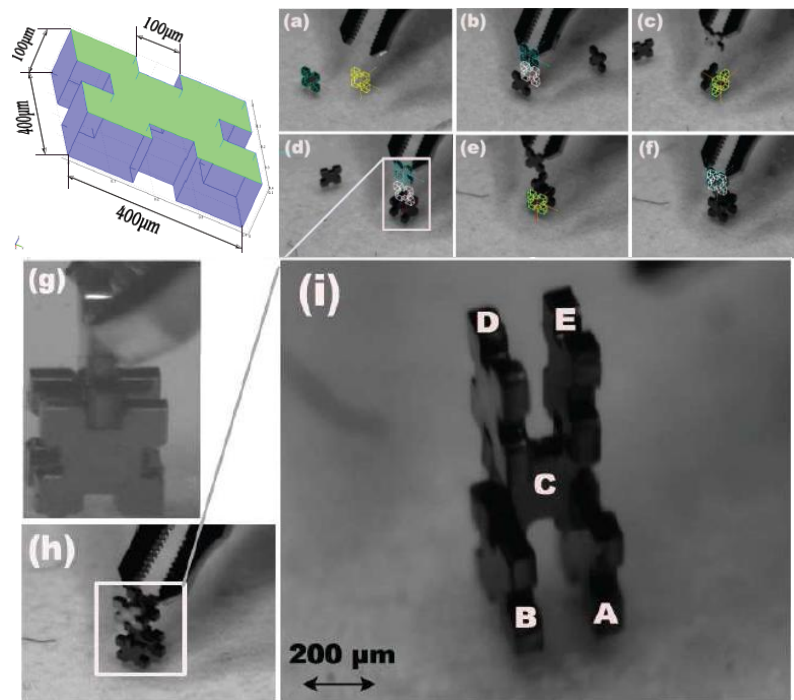
Après une longue période de travaux pour développer des outils de visualisation et d'assistance à l'insertion par asservissement visuel, mais en vue d'acquérir aussi une compétence spécifique sur l'assemblage de double encoches, l'équipe SAMMI du département AS2M de femto-st [[Tam08b](#), [Tam09a](#)] dispose d'un savoir-faire d'une grande précision, tel qu'illustré ci-après, avec un micro-assemblage formé de cinq microcomposants et d'une quadruple insertion de pièce de relative grande dimension  $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$ . Cette prouesse a été possible également grâce à la présence de chanfreins d'insertion et d'un jeu fonctionnel beaucoup plus évident à contrôler à cette échelle, mais aussi d'un support d'insertion compliant qui évite la casse des doigts de la micropince. Tous ces artifices, issus de l'expérience acquise lors des précédentes campagnes expérimentales, autorisent dorénavant **100 % de réussite** à l'insertion en profondeur des encoches de cette taille.



4.11 – Aperçu du support d'insertion compliant - à trois ressorts –



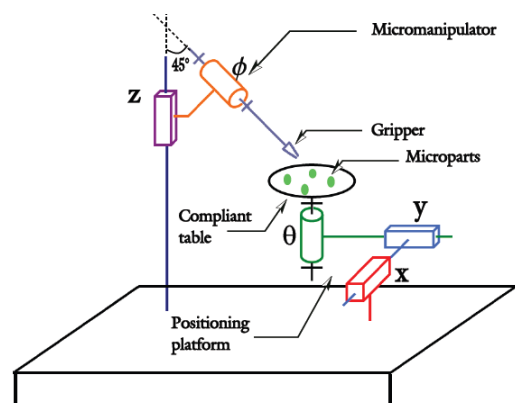
4.12 – Aperçu des chanfreins et du jeu d'insertion de  $3 \mu\text{m}$  dans un assemblage à double encoche



4.13 - Assemblage complet et multiple de simples encoches par asservissement visuel

#### 4.1.2.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales

Lors de sa campagne d'expérimentation [Tam09b], Brahim Tamadazte observe qu'il faut **dix minutes** à un opérateur-stagiaire disposant d'un mois d'expérience pour parvenir à un assemblage simple sur la station SAMMI - voir le schéma de mobilités-. La raison est qu'il faut faire preuve de concentration, de prudence et de dextérité pour éviter d'endommager la station ou une pièce ; cela est moins gênant pour cette dernière. Grâce à l'asservissement visuel qu'il a développé, un assemblage automatique dure **en moyenne 41 s** - entre 34 s et 37,4 s selon le tableau suivant-. Le gain temporel d'un **facteur quinze** est remarquable, mais il ne faut pas se laisser éblouir par cette prouesse et en oublier le gain énorme de fiabilité du fonctionnement qui préserve l'intégrité de la station devenue cellule de production en s'automatisant.



4.14 – Description des mobilités de la station SAMMI



Durée d'une phase de : / N° de l'essai	Prise & dépose du premier microcomposant	Prise & insertion du second microcomposant	Durée totale [s]
Assemblage 1	25.9	13.9	39.8
Assemblage 2	29.7	11.7	41.4
Assemblage 3	22.0	12.0	34.0
Assemblage 4	28.3	11.5	39.8
Assemblage 5	35.7	11.7	47.4
Assemblage 6	31.3	12.0	43.3
Assemblage 7	28.8	11.8	40.6
Assemblage 8	29.4	11.9	41.3
Assemblage 9	27.8	11.9	39.7
Assemblage 10	29.4	11.7	41.1
<b>moyenne</b>	<b>28.8</b>	<b>12.0</b>	<b>40.8</b>

Lors d'une seconde campagne expérimentale [Tam09c], Brahim Tamadazte a relevé les ordres de grandeur en précision et taux de réussite pour une opération de « pick and place » décomposée en six étapes. La première d'entre elles consiste à assurer un alignement angulaire « Ali. Ang. » par l'orientation de la table de travail - objectif d'erreur statique :  $0,5^\circ$  -. Pour la seconde étape, le positionnement en centrage « Pos. Cen. » déplace la table en X et Y et centre donc le microcomposant sous la pince. La troisième est celle de la fermeture de la pince « Fer. Pin. » : le déplacement d'un doigt est déterminé puis il est reproduit à l'inverse pour l'autre doigt ; une fois le contact établi, le serrage est obtenu par quelques incréments de déplacement supplémentaires qui, via la raideur des doigts de la pince, exercent une micro-force. L'ascension « Asc. » forme la quatrième étape par pilotage de l'axe Z de la pince. La cinquième est celle du transfert et de la descente « Tra. Des. » grâce aux axes X et Y de la table et du Z de la pince ; il s'agit de venir tangenter la table avec une indispensable vue latérale en retour. La sixième et dernière étape de dépose et lâché « Dép. Lâc. » n'est validée qu'après avoir observé une séparation du microcomposant d'avec les deux doigts de la pince. Le tableau qui suit détaille les précisions et réussites ou échecs pour sept tentatives automatiques.

N° essai	Tâche	Ecart initial à annuler	Précision finale	Résultat	observation
1	Ali. Ang.	14 °	0.09 °	Succès	
	Pos. Cen.	1029 µm	0.43 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.72 µm	Succès	
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
2	Ali. Ang.	32 °	0.27 °	Succès	
	Pos. Cen.	1015 µm	4.91 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.77 µm	Succès	Dépassement
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
3	Ali. Ang.	21 °	0.27 °	Succès	
	Pos. Cen.	1321.5 µm	0.77 µm	Succès	Occultation
	Fer. Pin.	163 µm	1.44 µm	Succès	
	Asc.	Succès	Succès	Succès	
	Tra. Des.	Succès	Succès	Succès	
	Dép. Lâc.	Succès	Succès	Succès	
4	Ali. Ang.	7.53 °	0.68 °	Succès	
	Pos. Cen.	992.5 µm	6.16 µm	Echec	Ecart important
	Fer. Pin.	Echec	/	/	
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
5	Ali. Ang.	33.8 °	Echec	Echec	Occultation
	Pos. Cen.	1750 µm	/	/	
	Fer. Pin.	163 µm	/	/	
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
6	Ali. Ang.	13 °	0.24 °	Succès	
	Pos. Cen.	560.7 µm	0.86 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	Echec	Echec	Effet électrostatique
	Asc.	/	/	/	
	Tra. Des.	/	/	/	
	Dép. Lâc.	/	/	/	
7	Ali. Ang.	15.5 °	0.52 °	Succès	
	Pos. Cen.	348.2 µm	0.64 µm	Succès	
	Fer. Pin.	163 µm	1.11 µm	Succès	
	Asc.	/	/	Succès	
	Tra. Des.	/	/	Succès	
	Dép. Lâc.	Echec	Echec	Echec	Force capillaire

Conclusion : Seuls trois essais ont abouti sur les sept tentatives. Ainsi, le taux d'échec est de 57 %, mais nous avons la chance de disposer d'informations sur les causes de ces échecs. La décomposition de la phase de « pick and place » et la présence d'indicateurs – les mesures et enregistrements vidéo - sont déterminantes dans l'évolution à donner pour reconfigurer ou réorganiser la cellule. Les raisons des échecs sont soit liées à la qualité du développement de la cellule utilisée – un écart est dû à un asservissement dont la synthèse du correcteur est inadaptée, une occultation est causée par un défaut de planification de la trajectoire -, soit à des aléas du micromonde – les effets électrostatique et de capillarité ne sont pas quantifiés par la cellule -. Par exemple, une reconfiguration consiste à programmer une trajectoire planifiée automatiquement par des champs de potentiel avec une source (la position initiale), des sommets (les doigts de la pince et les bords de l'image pour éviter de sortir du champ de vision, au potentiel répulsif) et un puits (la destination, au potentiel attractif). Quant à la réorganisation, elle consiste par exemple à modifier l'implantation matérielle des micro-actionneurs ou l'environnement, y compris atmosphérique, afin de réduire l'apparition des efforts électrostatiques et capillaires – le travail en immersion aqueuse est une solution possible -. Enfin, n'oublions pas que l'assistance automatisée ou semi-automatisée est à prendre en compte pour la préservation de la cellule en évitant des casses de matériel provoquées par un opérateur trop incompetent.

### 4.1.3 Troisième base expérimentale

Pour finir, nous disposons d'une intéressante source de savoir-faire et retour d'expériences de micromanipulation à travers les travaux de doctorat de Mélanie Dafflon [Daf08] sur des objets de dimension similaire à ceux utilisés par David Hériban - 50  $\mu\text{m}$  -. Son manuscrit nous apprend avec quelle performance elle est en mesure de réussir une micromanipulation.

Cinq technologies de manipulation ont été essayées et pour chacune d'elles, l'influence de divers paramètres a été chiffrée :

- par pincement en opposition, avec des micropinces, en fonction :
  - o de l'humidité relative, qui influence les effets de la capillarité aux interfaces sur le préhenseur et sur le substrat ;
  - o de la nature des matériaux, et plus précisément la présence ou non d'une couche hydrophobe sur les doigts du préhenseur, ou d'un dépôt de 10 [nm] de chrome sur le substrat en verre ;
- avec préhension par adhésion et dépose inertielle, en fonction :
  - o de l'humidité relative ;
  - o de la fréquence de(s) l'impulsion(s) de dépose ;
  - o de la quantité d'impulsions sinusoïdales – d'une jusqu'à un train de dix-;
- par capillarité en fonction :
  - o de la condensation, et de l'évaporation ;
  - o de la géométrie - cubique vs sphérique - et des matériaux - silicium vs polystyrène – manipulés ;
- par l'usage de charges électrostatiques, en fonction :
  - o de la tension minimale de prise ;
- par vide « vacuum », pour la prise et dépose inertielle.

#### 4.1.3.1 Synthèse des taux de réussite et des statistiques expérimentales

Le huitième chapitre de la thèse de Mélanie Dafflon [Daf08] intitulé « opérations de micromanipulation » laisse apparaître d'intéressants ordres de grandeurs que nous allons sélectionner et recenser dans les tableaux suivants<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Numérotation identique au manuscrit d'origine pour faciliter un approfondissement au lecteur souhaitant s'y référer en détail.

Nous disposons, tout d'abord, des performances de positionnement, à différents taux d'humidité relative, lors de manipulations effectuées avec une pince pneumatique et des embouts en silicium de 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur :

- tableau 8.2 -

SUBSTRAT	HUMIDITÉ RELATIVE	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	3% $\pm$ 1%	7.98	8.94	76%
	21% $\pm$ 1%	5.08	8.18	89%
	44% $\pm$ 3%	3.44	4.76	91%
Verre + coating hydrophobe	3% $\pm$ 1%	11.9	2.62	95%
	21% $\pm$ 1%	6.14	2.34	89%
	44% $\pm$ 3%	13.88	3.14	93%

Conclusion : Le revêtement hydrophobe est utile principalement lorsque l'atmosphère de l'environnement de travail est sèche - de 3 % - ; il accroît alors de 19 points le taux de réussite d'une dépose. En revanche - et c'est le revers de la médaille -, la distribution en positionnement s'en trouve dégradée avec d'importants écarts, significatifs, entre X et Y.

Le tableau suivant nous indique les résultats de positionnement de billes de polystyrène de  $\varnothing$  50  $\mu\text{m}$  à l'aide d'une pince MEMS en présence ou non d'un dépôt hydrophobe sur les embouts :

- tableau 8.3 -

SUBSTRAT	REVETEMENT HYDROPHOBE AU PRÉHENSEUR	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE
		x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	Non	1.34	1.48	86%
	Oui	1.68	1.84	93%
Verre + 10nm chrome	Non	1.32	2.20	71%
	Oui	1.40	1.76	89%

Conclusion : Non seulement nous apprenons que le dépôt hydrophobe améliore significativement la dépose de +7 points et +18 points, mais il apparaît, de surcroît, que le dépôt de 10 nm de Chrome dégrade la dépose, en comparaison à un substrat de verre seul, sans affecter significativement la répétabilité.

La synthèse relative aux performances de positionnement obtenues lors de la dépose de billes de polystyrène de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  à l'aide d'une micropince pneumatique munie d'embouts en acier inoxydable avec une couche hydrophobe, est la suivante :

- tableau 8.4 -

SUBSTRAT	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE
	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	12.36	6.08	71%
Verre + 10nm chrome	2.92	3.42	59%

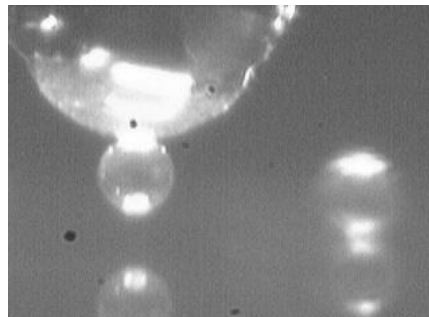
Conclusion : La technologie pneumatique est moins efficace que la technologie MEMS ( -22 et -30 points), et la meilleure réussite sans la couche de chrome se confirme. En revanche, le revêtement de Chrome améliore de 24 à 56 % la qualité de la dépose avec une meilleure répétabilité.

La série d'expériences suivantes traite des cas de saisie par inertie. Ici, contrairement à la stratégie précédente de prise par pincement issue du mésomonde et identique à la technique de David Hériban, il s'agit de prélever le microcomposant par adhésion surfacique puis de le déposer par inertie – en le secouant -, à la manière dont on saisit une miette de pain en humidifiant le bout de son doigt et dont on s'en débarrasse en le secouant rapidement. Le taux de réussite traduit la prise «touch and go» obtenue, au premier essai, par adhésion contre une surface sphérique en verre d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  posée sur un substrat lui-même en verre recouvert d'une couche hydrophobe. Les conditions de l'environnement ambiant de manipulation durant les expérimentations sont précisées puisque c'est principalement la capillarité qui intervient :

- tableaux 8.5 & 8.6 -

INTITULÉ	HUMIDITÉ RELATIVE	TEMPÉRATURE	Taux de réussite
2%	2.3% $\pm$ 1.0%	24.9°C $\pm$ 0.2°C	54%
20%	20.9% $\pm$ 1.0%	25.0°C $\pm$ 0.6°C	71%
40%	42.9% $\pm$ 1.9%	23.7°C $\pm$ 1.2°C	83%

Conclusion : L'auteur nous fait remarquer que « *Finalement, divers effets aléatoires sont apparus comme les sauts inopinés des billes ou leur retour vers une position toujours identique lors de prises ratées par exemple. Ces effets semblent dûs à la présence de charges électrostatiques. Ils apparaissent parfois dès les premières opérations sur une bille, mais interviennent souvent aussi après une série de manipulations. Ces effets électrostatiques sont aussi nettement plus importants à faible humidité relative* ». L'humidité relative ambiante est déterminante puisqu'elle apporte jusqu'à 29 points de taux de réussite supplémentaire réduisant l'influence des charges électrostatiques perturbatrices.



#### 4.15 – Vue du préhenseur sphérique et la micro-bille - et deux reflets -

Après la saisie vient l'étape de dépose par inertie. Il s'agit alors de relever la fréquence minimale – seuils - d'excitation de l'actionneur piézoélectrique qui induit cette dépose en mode single - une unique impulsion sinusoïdale - :

- tableau 8.7 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHZ]	ECART-TYPE [KHZ]	MIN [KHZ]	MAX [KHZ]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	213.16	44.12	150	310	87%
20%	239.6	43.54	160	330	81%
40%	253.33	55.75	140	400	88%

Conclusion : La fréquence est d'autant plus élevée que l'atmosphère est humide. La réussite de la dépose n'est pas assurée.

Une opération similaire de dépose par inertie en mode multiple –un train de dix impulsions sinusoïdales- permet la mesure des seuils de fréquence minimum :

- tableau 8.8 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHZ]	ECART-TYPE [KHZ]	MIN [KHZ]	MAX [KHZ]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	252.73	52.93	160	380	100%
20%	227.92	40.96	150	340	96%
40%	243.29	65.35	130	490	100%



Conclusion : Le mode multiple est plus efficace car la dépose est quasiment garantie. Mais il subsiste une grande dispersion des fréquences dues à des conditions d'interfaces non reproductibles, ni stables.

Dès lors, il est possible de recenser la force d'inertie équivalente nécessaire à la dépose et calculée à partir des mesures de la fréquence minimale.

- tableau 8.9 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	FORCE ÉQUIVALENTE [μN]		
		MOY.	MIN	MAX
2%	Single	7.6	3.5	15.0
	Multiple	10.3	4.0	22.3
20%	Single	9.2	4.0	16.8
	Multiple	8.3	3.5	17.9
40%	Single	10.4	3.0	24.7
	Multiple	9.8	2.6	37.1

Conclusion : La valeur minimale confirme la présence d'un ménisque à l'interface. Cependant, l'effort est étonnamment supérieur en mode multiple à 2 % d'humidité seulement – et non pas à 20% ou 40 % comme on pourrait s'y attendre -. Cette incohérence peut se justifier par la qualité des surfaces intervenantes.

Il s'agit maintenant d'évaluer les performances de positionnement à la fréquence minimale induisant la dépose :

- tableau 8.10 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [μm]	y [μm]	Dépose	Erreur < 20μm
2%	Single	8.82	6.84	87%	84%
	Multiple	3.76	4.02	100%	91%
20%	Single	11.04	1.98	81%	77%
	Multiple	6.92	4.86	96%	92%
40%	Single	7.36	3.14	88%	81%
	Multiple	7.86	5.18	100%	92%

Conclusion : La meilleure précision de la dépose apparaît nettement avec un train d'impulsions (+ 7, +15 et +11 points selon l'humidité relative).

Ces mêmes performances de positionnement sont quantifiées pour un seuil de 350 kHz ce qui éviterait, dans une automatisation, d'avoir à piloter la fréquence en fonction d'une mesure de l'humidité. Notons que cette fréquence est inférieure aux fréquences maximales observées précédemment pour assurer la dépose, notamment lors d'une forte humidité relative :

- tableau 8.11 -

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [µm]	y [µm]	Dépose	Erreur < 20µm
2%	Single	7.82	3.74	59%	48%
	Multiple	5.62	1.80	97%	97%
20%	Single	9.50	1.88	73%	70%
	Multiple	11.84	4.38	100%	93%
40%	Single	8.74	5.26	92%	89%
	Multiple	7.78	4.94	100%	90%

Conclusion : Les performances sont meilleures en mode multiple, car comme l'auteur le souligne à juste titre :

*« L'utilisation d'un seuil élevé, qui induit une force d'inertie plus grande que nécessaire, n'améliore ni le taux de réussite de la dépose, ni par ailleurs le positionnement. Il vaut donc mieux un signal minimal et répétitif qu'une impulsion à haute fréquence. Il apparaît aussi que la répétabilité du positionnement est meilleure à basse humidité relative. Ceci pourrait s'expliquer par une perturbation due à la présence d'un ménisque à plus haute humidité relative dont la rupture serait moins homogène qu'en cas de contact sec. »*

Cette remarque sur les fréquences critiques nous replonge dans la description d'une IHM qui doit être en mesure de déceler, par exemple dans un souci d'ergonomie, la vivacité d'un appui de l'opérateur sur une touche, à l'image de l'attaque du pianiste à laquelle nous avons déjà fait allusion.

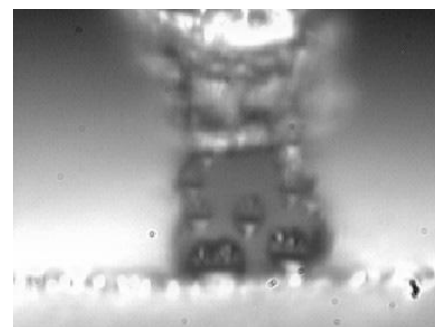
Avant de pousser un peu plus loin l'analyse des expérimentations, remarquons que de nombreuses informations utiles à la micromanipulation viennent d'être mentionnées mais d'autres paramètres déterminants dans la reproductibilité de ces expériences n'ont pas été recensés. Il est naturel de penser que l'orientation selon laquelle s'effectue cette dépose est très influente – ici, l'auteur précise que cela s'est fait à la perpendiculaire du substrat, mais était-il horizontal ? -. Et quelle est

l'influence de la température ? Et quelle température ? Ambiante, celle du préhenseur, celle du substrat, celle de la bille ? Autant de valeurs qui enrichiront ad vitam les bases de données du système d'information.

Une autre stratégie de prise et dépose consiste à utiliser les efforts de capillarité en agissant sur un cycle de température du préhenseur pour condenser et/ou évaporer le ménisque. Les variations de température ne sont imposées que par un effet Peltier au niveau du préhenseur. Pour agir sur le substrat, il est choisi d'utiliser la conduction dans le microcomposant :

- tableau 8.12 -

MICROCOMPOSANT	OPÉRATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Cubes 50 $\mu\text{m}$ silicium	Prise	3.40	2.46	97%
	Dépose	4.00	6.36	83%
Billes Ø50 $\mu\text{m}$ polystyrène	Prise	8.08	8.92	75%
	Dépose	9.80	6.80	79%



**4.16 – Vue de microgouttes condensées sur un cube de silicium**

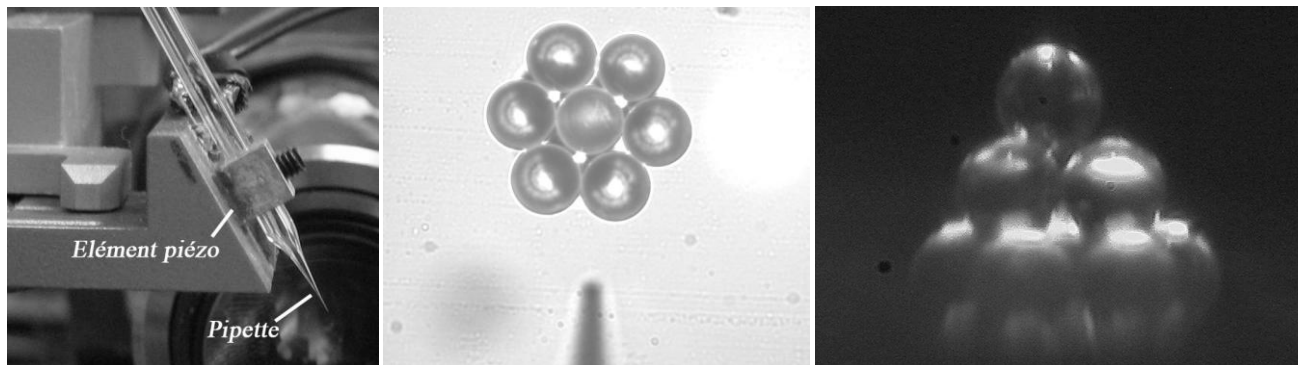
Conclusion : La forme et/ou le matériau du microcomposant influence grandement l'opération lors de la prise (+ 14 points) et sensiblement à la dépose (+ 4 points). Cependant, l'aspect temporel n'est pas quantifié et la cinétique thermique est relativement lente bien qu'accélérée au regard du mésomonde par les faibles dimensions, donc les faibles volumes et la faible quantité de chaleur à gérer.

Le dernier cas présenté est celui d'une préhension par vide d'air - vacuum - d'une bille de Ø 50  $\mu\text{m}$  en polystyrène avec une pipette de Ø 13  $\mu\text{m}$ , avec ou sans vibration - à 2 kHz en signal carré -. Le critère observé est celui de la répétabilité de positionnement sur un substrat en verre :

- tableau 8.13-

TYPE DE DÉPOSE	RÉPÉTABILITÉ DE POSITIONNEMENT			
	PRISE		DEPOSE	
	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]
Avec vibration	2.83	5.81	1.56	3.19
Sans vibration	2.18	3.77	3.29	16.41

Conclusion : Les billes sont en général attirées sur des distances allant jusqu'à 12  $\mu\text{m}$  et la vibration de l'actionneur piézoélectrique n'affecte pas la capacité de prise. Le contact avec le composant n'est même pas nécessaire dans 78 % des cas, où la saisie se produit à une distance [orifice-composant] variant de 1 à 3  $\mu\text{m}$  - valeur pour une humidité relative de 42 %  $\pm$  3 % -. La présence de la vibration améliore grandement la répétabilité de la dépose avec 79 % de précision supplémentaire.



**4.17 – Vue surprenante de l'opération d'assemblage pyramidal de 11 billes de  $\varnothing$  50  $\mu\text{m}$  en polystyrène et vue de la technologie de pipette utilisée**

## 4.2 Simulation et validation de modèles de SI

Au vu de ce qui vient d'être développé, les simulations s'appuient sur un savoir-faire expérimental qui nous permet d'initialiser les paramètres déterminants dans l'évolution de la simulation du système micro-usine. Techniquement, l'objectif est double, à l'image des expérimentations qui ont guidé la progression actuelle de la micro-usine. Il s'agit d'observer les résultats, d'une part, des réussites expérimentales qui contribuent - comme les échecs mais pour une moindre mesure - à l'accroissement de la connaissance, et d'autre part, de la temporalité qui contribuera à l'expansion du concept de micro-usine et à sa démocratisation.

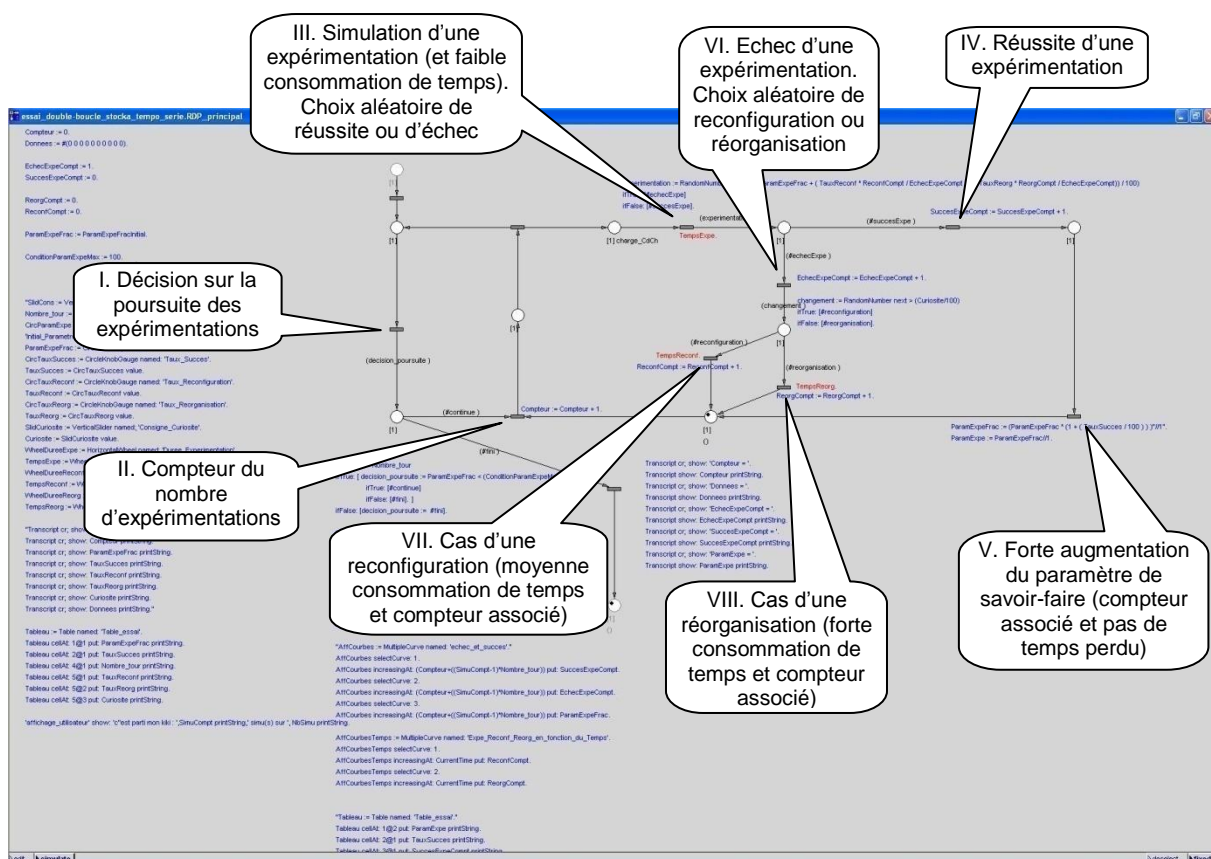
Afin d'estimer la qualification de la micro-usine, nous avons opté pour un plafonnement relatif des connaissances à travers un taux exprimé en pourcentage. La saturation à 100 % de ce paramètre est arbitraire puisque nous considérons que, dans le cas réel, de nouvelles propriétés du micromonde auront une influence sur le comportement des micro-objets. Cette immensité du domaine micrométrique est bien amenée à évoluer ad-vitam puisque nous ne pouvons garantir un inventaire exhaustif des paramètres. La géométrie et les dimensions, les matériaux - densité, rigidité, homogénéité, porosité -, les dépôts surfaciques - l'état de surface ; sa morphologie parfois hydrophobe -, ou encore la conductivité électrique sont autant de paramètres à fort impact sur le micromonde. Plus tard, nous pourrions être amené à observer que les couleurs, l'indice optique de réfraction, la porosité et, qu'en savons-nous dans l'immédiat, peut-être même l'âge d'une cellule biologique manipulée et/ou son histoire, ont une influence déterminante sous certaines conditions.

La définition des connaissances que nous venons de citer - l'infini est donc ici considéré à 100 %, au plafond -, nous amène abusivement, mais consciemment, à une première hypothèse qui nous permet de relancer la simulation afin d'observer sa répétabilité et l'évolution moyenne probable du système. Nous verrons qu'à quelques exceptions près, les simulations successives sont assez répétables.

## 4.2.1 Description du simulateur d'évolution d'une micro-usine

### 4.2.1.1 Le réseau de Petri au cœur du simulateur

Tel que proposé dans la littérature [LamS03] pour la simulation de systèmes industriels reconfigurables, nous avons procédé, à partir d'un réseau de Petri [Pet73], à la construction d'un modèle représentant l'évolution d'une micro-usine<sup>8</sup>. Ce réseau principal est stochastique et temporisé pour, premièrement, inclure les aléas du micromonde et, deuxièmement, observer l'impact des temps importants de reconfiguration et surtout de réorganisation sur l'aboutissement d'une mise en production efficace. Soulignons cependant que ces deux aspects, chronologie et indéterminisme, sont indépendants ; une évolution possible de ce modèle consiste à inclure une gestion des choix de scénarii en fonction de l'historique, voire d'une échéance à tenir.



4.18 - Le RdP aléatoire - stochastique - et T-temporisé simulé avec PACE

<sup>8</sup> La figure 4.22 propose une vue globale, commentée, de l'ensemble du réseau de Pétri utilisé.

En présence d'une nouvelle fabrication, il faut estimer le taux de connaissance initial et le saisir sur le pupitre du simulateur à partir du bouton rotatif « paramètre initial d'expérimentation » - figure 4.20, n° 2, bleu en haut à gauche -. Sa valeur dépend de l'expérience acquise antérieurement, pour un micro-produit a priori similaire, par la micro-usine et l'opérateur.

Ensuite, la simulation essaye de progresser, tant que le cadran - n° 11, rouge en haut à droite du pupitre - « paramètre d'expérimentation », relatif au taux de connaissance, n'atteint pas la valeur 100 % ou que l'on n'a pas épuisé un nombre d'essais maximal fixé initialement par le « nb de tours maxi » - curseur n° 3 vertical bleu situé en haut à droite du pupitre -. En pratique, par exemple, cette condition de sortie s'appuie sur une quantité maximale de microcomposants disponibles avec un wafer au-delà de laquelle l'expérimentation s'arrêtera quoiqu'il en soit. L'afficheur vertical - n° 9, jaune et rouge situé en haut à droite du pupitre - permet d'observer sur chaque production si l'on flirte ou non avec cette limite physique avant d'atteindre le taux final de connaissance expérimentale.

Dès lors qu'une expérimentation est essayée, afin d'assurer une interprétation des résultats, nous avons limité à deux familles de tirages aléatoires la suite des événements :

- le premier et principal tirage décide de la réussite ou de l'échec de l'expérimentation - transition de la bulle n° 3 ; le résultat du tirage aléatoire est comparé à la connaissance ; s'il est supérieur alors c'est un échec, si c'est la connaissance qui est supérieure alors l'expérience est une réussite - ;
- en cas d'échec, un second tirage permet de procéder soit à une reconfiguration, soit à une réorganisation - transition de la bulle n° 6 ; le tirage aléatoire est comparé à une consigne de curiosité -.

Les conséquences de réorganisation ou reconfiguration sont plus ou moins avantageuses ou pénalisantes sur les critères d'occurrence d'une réussite à venir et sur l'impact temporel. Ces derniers se résument assez bien avec le tableau suivant, et seront approfondis lorsque nous traiterons les cas de simulations :

Décision suite à un échec	Probabilité d'une réussite à venir	Impact temporel
Reconfiguration	Moins probable	Faiblement pénalisant
Réorganisation	Plus probable	Fortement pénalisant



Le tirage relatif à cette décision est rapporté à un paramètre appelé « consigne\_curiosité » qui, selon sa position, oriente la décision à prendre en cas d'échec - curseur vertical n° 7 vert situé en haut à gauche du pupitre -. Le réglage de ce curseur traduit l'engagement prospectif de la micro-usine pour la production en cours. Les initiatives et une certaine prise de risque en prospection sont susceptibles de provoquer de grandes avancées avec de nouveaux champs de connaissance, mais aussi de provoquer de lourdes pertes notamment de temps en cas d'échec total.

A la fin d'une expérience, la connaissance progresse inéluctablement. Nous disposons de trois taux de progression pour initialiser la simulation ; ils sont accessibles par les curseurs n° 4, 5 et 6 - détaillés ci-après -. Nous prendrons soin de les régler de sorte que le taux suite à une réussite soit supérieur à celui d'une réorganisation, et lui-même supérieur à celui d'une reconfiguration.

Soulignons un cas concret d'intervention d'un phénomène aléatoire pouvant apparaître lors de l'assemblage de la microvache. Après avoir placé le corps sur le gel pack orienté sur l'arrête dorsale de l'animal, il s'agit d'insérer les deux paires de pattes postérieures puis antérieures, ou antérieures puis postérieures. Alors que l'ordre de ces insertions semble sans influence pour un opérateur, il s'avère que face à un scénario d'assemblage peu robuste, la réussite peut évoluer d'un assemblage à l'autre.

En effet, les efforts surfaciques, induits à distance - donc inattendus par un opérateur novice - par les charges électrostatiques arrachées par l'insertion et qui s'accrochent sur les pattes et sur le corps, n'ont pas le même effet du côté postérieur et du côté antérieur puisque la géométrie de la queue, assez fine mais proche de la fente postérieure, est différente de celle du profil de la tête plus grosse mais aussi plus éloignée de la fente antérieure d'insertion. Ces charges électrostatiques ne sont pas très répétables puisqu'elles dépendent fortement des positions et orientations relatives, ainsi que du jeu fonctionnel réel ; et tous ces paramètres changent d'un assemblage à l'autre. Ainsi, la réussite de l'insertion de la première paire de pattes est différente selon que l'on insère d'abord les pattes antérieures ou les pattes postérieures.

Ensuite, lorsque la seconde paire de pattes est insérée, elle est influencée par la paire déjà en place qui accumule à son tour des charges électrostatiques. Ainsi,

dans l'ordre d'assemblage, nous observons qu'une même opération n'aura pas le même taux de réussite selon qu'elle intervient avant ou après une autre opération qui influence désormais son environnement proche.

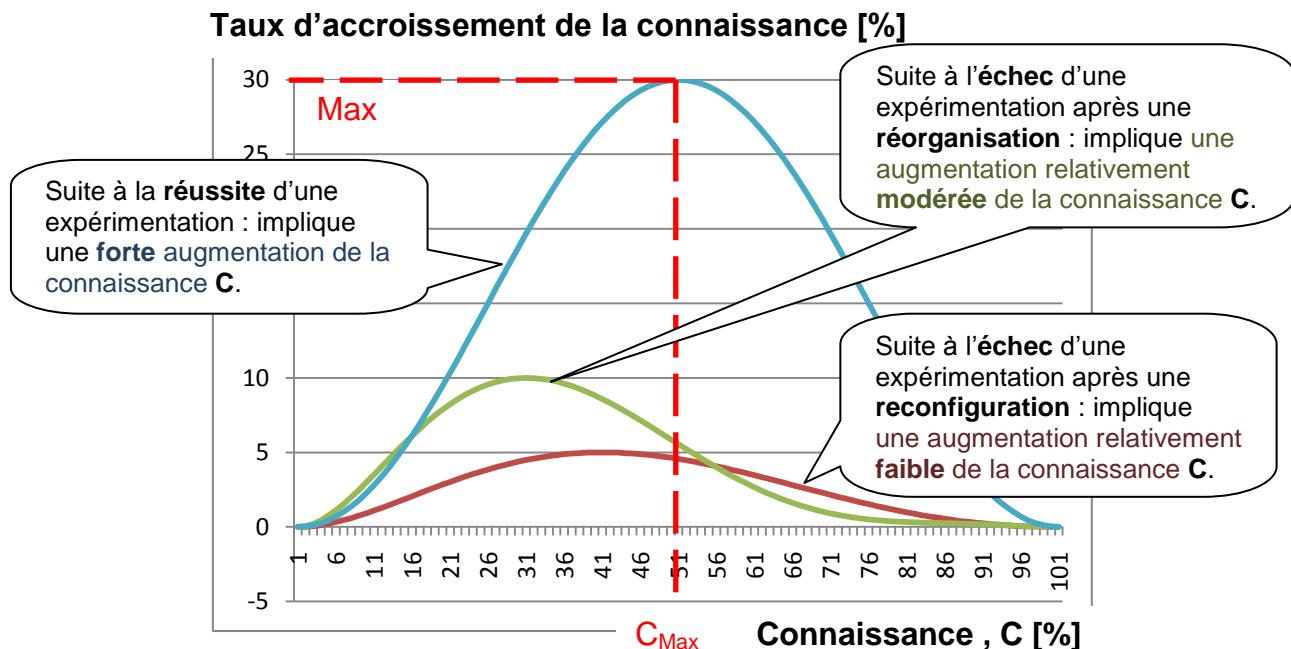
Par conséquent, lors du principal tirage, pour décider de la réussite ou de l'échec par le simulateur, seul intervient le paramètre « connaissance expérimentale » car plus on a de connaissances, moins on risque l'échec.

Dans le code du simulateur de réseau de Petri, ce paramètre est appelé ParamExpe puisqu'il évolue à chaque expérience et dépend bien des résultats des expériences antérieures. De ce fait, la connaissance va croître à chaque expérience plus ou moins selon qu'elle aboutit à un succès ou à un échec successif à une reconfiguration ou une réorganisation. Afin de respecter l'idée d'une connaissance absolue quasi-inatteignable, nous calquons le modèle d'évolution de la connaissance sur un profil en sigmoïde. Trois périodes se distinguent : la première avec une lente progression de la connaissance lorsque l'on initie un nouveau procédé, une seconde avec une rapide progression lorsque l'on commence à maîtriser le contexte, et une troisième avec une progression décroissante permettant une lente convergence vers la connaissance totale.

Nous avons opté pour une modélisation de l'évolution des taux de progression de la connaissance par une loi en cloche, sorte de Gaussienne que nous approximations par un polynôme, d'ordre six pour satisfaire des conditions aux limites. Ce choix polynomial, plutôt qu'avec des exponentielles, s'est imposé par l'absence d'une telle fonction dans la librairie de smalltalk. La loi est paramétrée par son maximum, l'abscisse de ce maximum et l'aire située sous la loi afin de la gonfler plus ou moins selon de « l'envergure » de opérateur – détermination des coefficients fournie en annexe (§ 6.3) -. Cette envergure dépend de la personnalité de l'opérateur et sa capacité à produire de nouveaux et efficaces scénarii à expérimenter avec reconfiguration ou réorganisation. La qualité du système d'organisation de la micro-usine et sa gestion de la connaissance impactent également cette envergure. Nous utilisons ainsi la loi pour définir les trois taux de progression, s'appuyant chacun sur trois triplets de boutons rotatifs - n° 4, 5, 6 -, destinés aux cas de réussite expérimentale, de reconfiguration et de réorganisation.

Rappelons que pour un fonctionnement réaliste de la simulation, il convient de régler ces lois polynomiales de sorte que le taux de succès soit supérieur à celui d'une réorganisation, lui-même supérieur à celui d'une reconfiguration.

La figure représente un exemple de lois d'évolution obtenues avec cet outil. La loi intermédiaire de réorganisation - en vert - intervient plus tôt que celle inférieure de reconfiguration justifiant l'intérêt d'une large prospection avec des réorganisations au début d'une campagne d'essais.



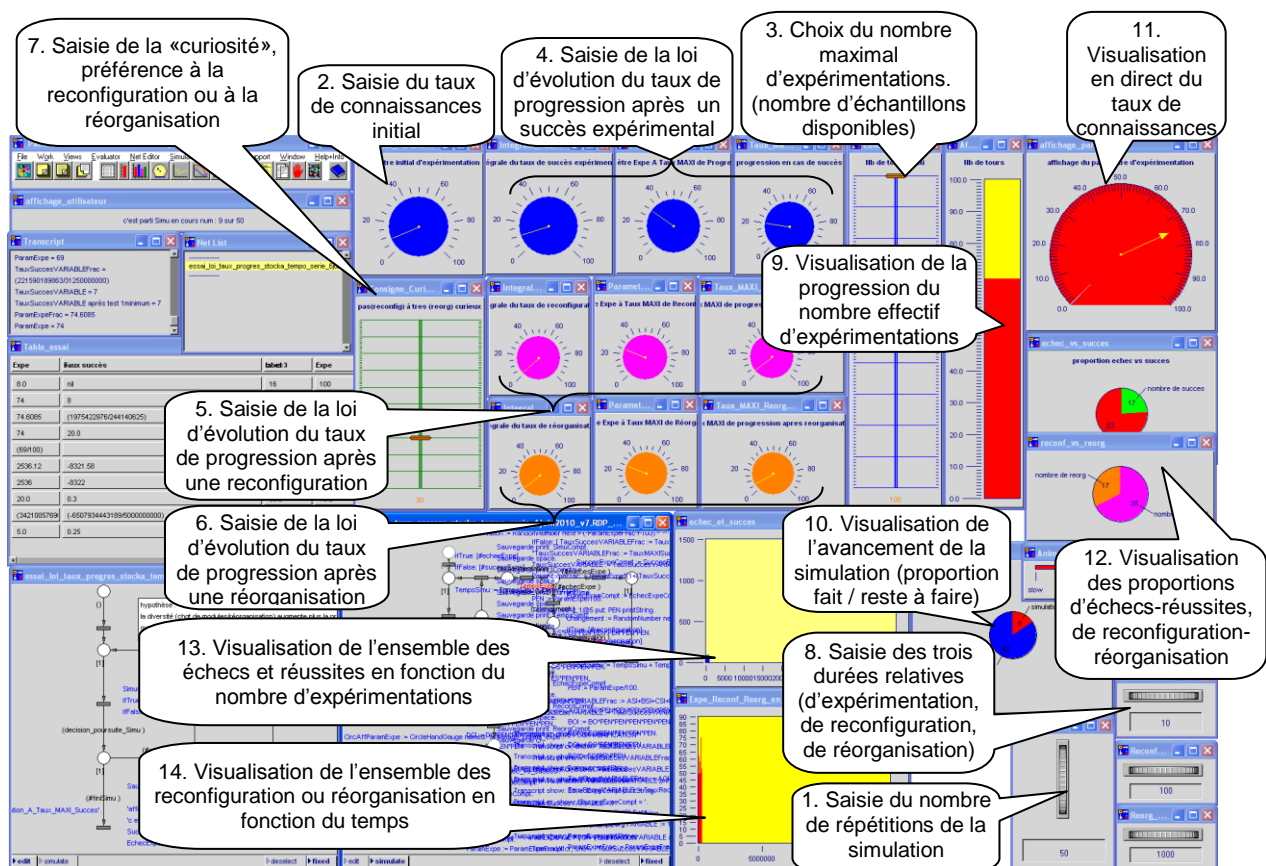
4.19 – Exemple type de lois polynômiales pour les taux de progression du ParamExpe

Concernant l'aspect temporel, trois paramètres sont associés à chacun des trois cas de figure : l'expérimentation - incluant la réussite - et, en cas d'échec, la reconfiguration et la réorganisation.

Ces paramètres sont accessibles pour l'initialisation de la simulation, en fonction des délais moyens connus pour les cas en question, grâce à trois curseurs horizontaux situés en bas à droite du pupitre, n° 8. Ils définissent l'incrément temporel à chaque franchissement de la transition à laquelle ils sont associés.

#### 4.2.1.2 La partie émergée du simulateur

La figure suivante permet d'appréhender le pupitre à renseigner par utilisateur du simulateur ainsi que les grandeurs visibles en cours de simulation. Les numéros un à huit configurent le simulateur, les numéros neuf à quatorze restituent le résultat de la simulation.

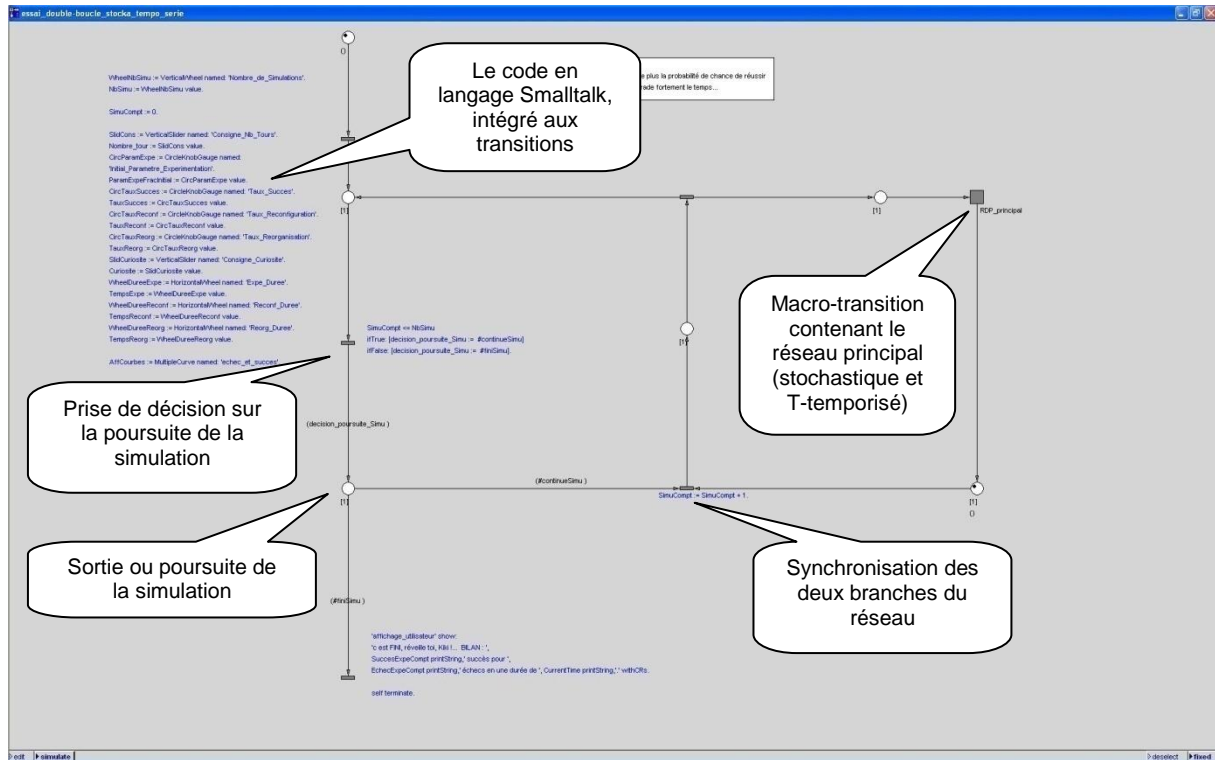


4.20 - Vue du pupitre de simulation avec PACE

#### 4.2.1.3 Une analyse statistique de la répétabilité

Il est nécessaire d'éviter toute généralisation abusive des résultats obtenus. Pour cela, la simulation est relancée plusieurs fois, ce qui autorise une détermination de la répétabilité afin de ne retenir que les évolutions moyennes du système. Ainsi, notre « réseau principal » est inclus dans un réseau hiérarchiquement supérieur qui l'exécute en boucle selon un réglage accessible sur le tableau de bord du simulateur sous l'appellation « Nombre\_de\_Simulations » - curseur n° 1 situé en bas à droite du pupitre -. Visuellement, le résultat de chaque simulation se remarque dans chaque période des deux chronogrammes - n° 13 et 14 sur fond jaune - en bas à droite du

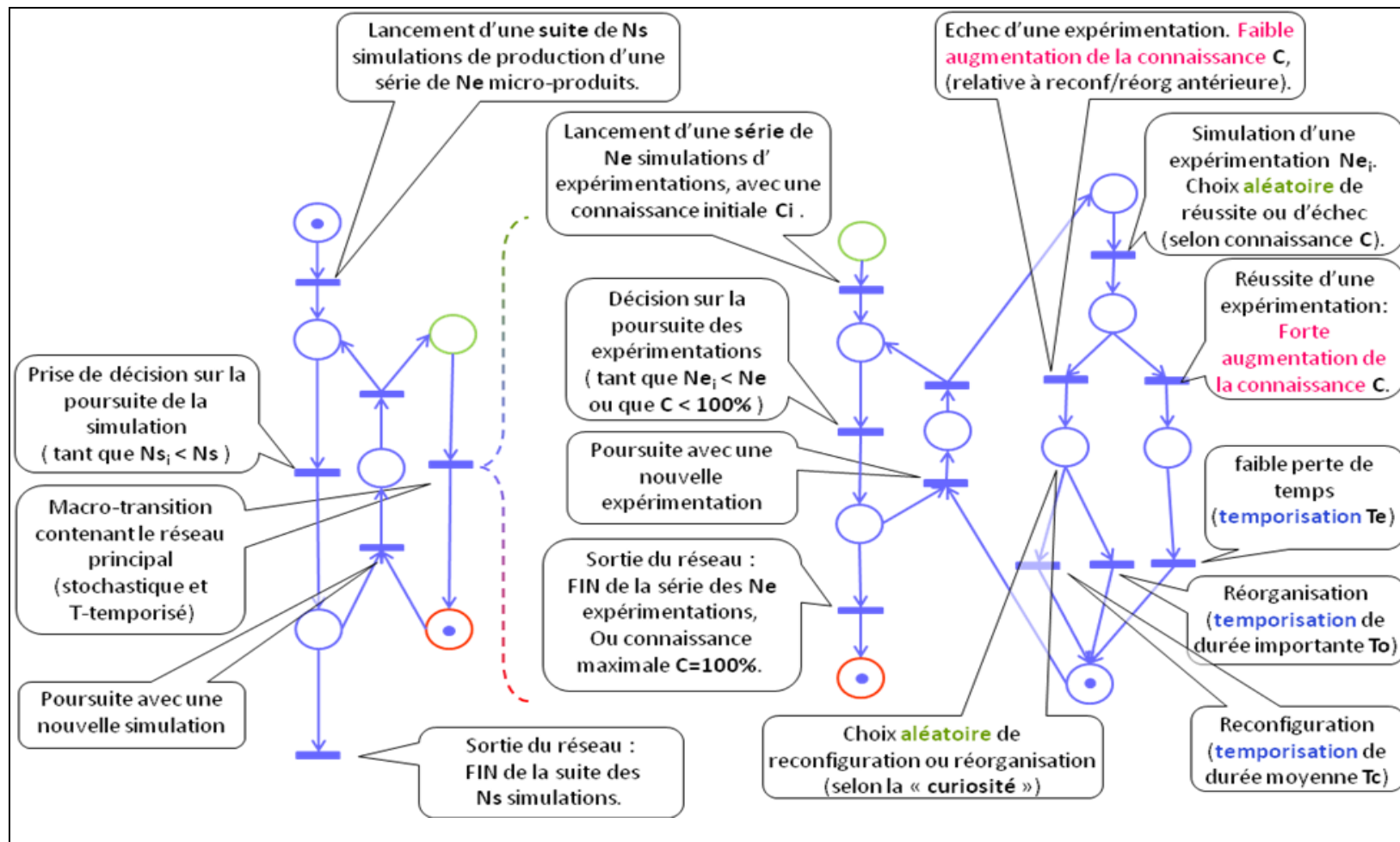
pupitre. Par ailleurs, techniquement, lors du franchissement de la première transition ce premier réseau initialise les paramètres d'entrée par la lecture des diverses valeurs choisies et configurées via le pupitre.



4.21 - Le réseau d'exécution en boucle de la simulation aléatoire pour permettre une analyse statistique

L'ensemble des données - initiales et résultats - est sauvegardé pour permettre une analyse avec Matlab qui empile les valeurs numériques dans des tableaux tridimensionnels et permet notamment leurs tri et affichage en trois dimensions. Ce traitement des résultats de simulation est également utilisé pour une analyse statistique.

La figure 4.22 présente une synthèse du réseau de Petri utilisé. Elle permet une vision globale du simulateur incluant les paramètres qui conditionnent les franchissements des transitions.



4.22 – Le réseau de Petri global et détails de sa composition

#### 4.2.2 Exploitation des résultats de simulation

Le programme du simulateur par réseau de Petri stochastique T-temporisé, développé sous PACE, comporte des observateurs - e. g. compteurs - dans le code des transitions. Ces derniers permettent, en cours de simulation, une prise de connaissance de chaque paramètre.

Ces informations sont enregistrées et permettent, d'une part, l'analyse post-simulation de l'influence des multiples paramètres d'entrée sur les grandeurs de sortie, voire la présence de corrélations. D'autre part, l'enregistrement peut autoriser de calculer pour chaque grandeur les statistiques de la simulation. Nous utiliserons ces enregistrements pour en apporter un affichage graphique lisible avec des tris selon différents aspects.



### 4.2.3 Les résultats de simulation

Nous allons maintenant présenter trois cas d'études - notés A, B et C - d'une prise en main d'une micro-usine par un opérateur novice – n'ayant que 10 % des connaissances nécessaires - et qui se différencient par leurs conditions initiales regroupées dans le tableau page suivante. En voici une description :

- le cas A se rapproche des micromanipulations et micro-assemblages réalisés en télé-opération par Mélanie Dafflon et David Hériban avec des microcomposants de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  :
  - o les temps de manipulation sont de l'ordre de la dizaine de minutes, une reconfiguration nécessite environ deux jours et une réorganisation un mois – respectivement 1, 100, 1000 minute(s) - ;
  - o la progression de la connaissance est régulière en cas de réussite expérimentale, ainsi que lors des reconfigurations, mais elle est plus importante en début de campagne pour les réorganisations - notamment faute d'opérations automatiques ou d'assistance logicielle sophistiquée - ;
  - o l'opérateur est assez peu curieux - préférant de deux tiers une réorganisation à une reconfiguration -.

Les cas B et C sont de l'ordre des développements menés par Brahim Tamadazte, avec des microcomposants de quelques centaines de  $\mu\text{m}$ , mais ils diffèrent principalement l'un de l'autre par la stratégie de curiosité qui est simulée :

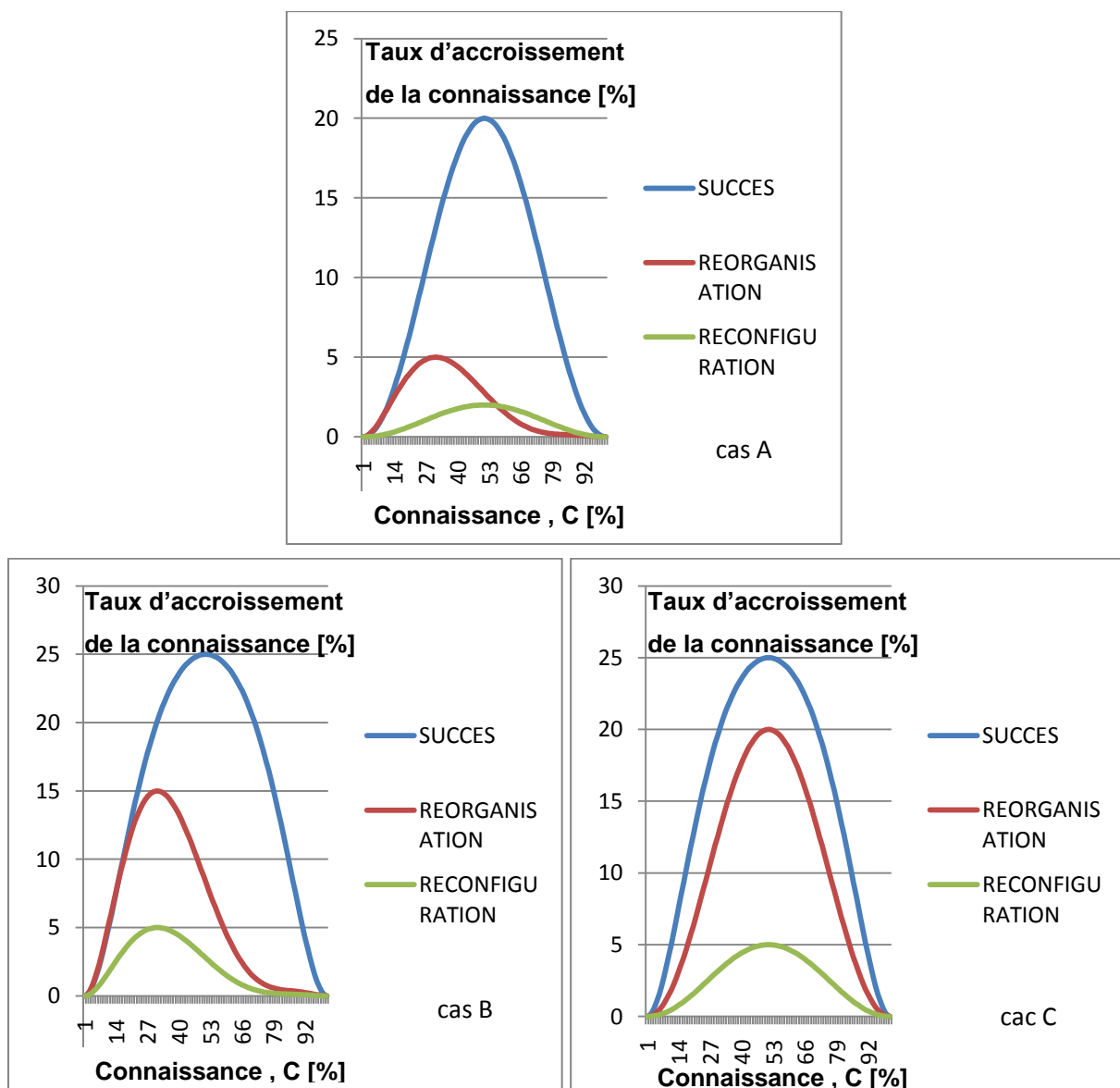
- le cas B est le plus curieux avec 50 % de réorganisation en cas d'échec, donc sa démarche est a priori chronophage, et sa connaissance progresse rapidement en début d'investigation tout en étant assez efficace ;
- le cas C vise un gain temporel avec une plus faible curiosité de 10 % seulement, mais quasiment aussi efficace qu'un succès. Le maximum de progression de la connaissance est centré à mi-parcours ;
- dans les deux cas, les durées sont de l'ordre de 1, 100, 20 000 minute(s), soit une minute pour une expérience, une heure-trente pour une reconfiguration et deux mois pour une réorganisation.

Pour ces trois cas, le nombre de micro-produits disponibles - appelé « nb\_tour » dans le réseau -, correspondant à la limite physique fixée par la taille d'un wafer, est choisi à cent. Les raisons pour lesquelles nous partons d'une même hypothèse, avec

un opérateur novice n'ayant que 10 % de connaissances, mais 10 % tout-de-même, s'expliquent par le fait que :

- cela permet à la simulation de progresser : un initié avec plus de connaissances accélérerait la fin de la simulation ; avec moins de 10 %, il se produit un long et lent décollage de la connaissance, sorte de « marais » finalement réaliste si l'on confie une micro-usine à un vrai débutant ;
- afin de comparer valablement les diverses simulations, il s'agit de fixer des paramètres ; ceux-ci et la quantité de microcomposants sont donc constants.

Procédons également à une centaine de simulations pour chaque cas afin de visualiser la répétabilité des résultats et leur distribution statistique.



**4.23 – Visualisation des taux de progression de la connaissance pour les cas A, B et C lors de succès, reconfiguration et réorganisation**

Paramètres	description	A	Observations A	B	Observations B	C	Observations C
Nombre_de_simulations	répétabilité de la simulation	100		100		100	
Nombre_de_tours_maximum	nb d'échantillons de microcomposants disponibles pour fiabiliser le procédé de production	100		100		100	
Expe_Duree	Durée de l'expérimentation	1	min	1	min	1	min
Reconf_Duree	Durée relative d'une reconfiguration	100	1h30 env	100	1h30 env	100	1h30 env
Reorg_Duree	Durée relative d'une réorganisation	1000	2 jours de travail = relativement rapide	20000	2 mois de travail = chronophage	20000	2 mois de travail = chronophage
Consigne_Curiosite	Ratio réorg/reconf à tirage aléatoire en cas d'Echec : faible=peu curieux=beaucoup de reconfiguration, élevé=très curieux=beaucoup de réorganisation	30	peu curieux	50	curieux	10	pas curieux
Initial_ParamExpe	Valeur initiale du paramètre de connaissance	10	novice	10	novice	10	novice
Integrale_Taux_Succes	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de succès (envergure)	10		15		15	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Succes	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de succès	50	centré	50	centré	50	centré
Taux_Maxi_Succes	Progression maximale de la connaissance en cas de succès	20	difficile = Maghi double encoches 40x40x5 [ $\mu\text{m}^3$ ] (Hériban, Dafflon)	25	raisonnable = double encoches 400x400x100 [ $\mu\text{m}^3$ ] (Tamadazte)	25	raisonnable = double encoches 400x400x100 [ $\mu\text{m}^3$ ] (Tamadazte)
Integrale_Taux_Reconf	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de reconfiguration (envergure)	1		2		2,5	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Reconf	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de reconfiguration	50	centré	30	rapidement	50	centré
Taux_Maxi_Reconf	Progression maximale de la connaissance en cas de reconfiguration	2	faible progression	5	progression correcte	5	progression correcte
Integrale_Taux_Reorg	Intégrale du taux de progression de la connaissance en cas de réorganisation (envergure)	2		6		10	
ParamExpe_a_Taux_Maxi_Reorg	Valeur de la connaissance pour le taux de progression maximal en cas de réorganisation	30	rapidement	30	rapidement	50	centré
Taux_Maxi_Reorg	Progression maximale de la connaissance en cas de réorganisation	5	progression correcte	15	assez efficace	20	efficace

4.24 – Tableau de synthèse des conditions initiales des simulations des cas A, B et C

#### 4.2.3.1 Aperçu des résultats de simulations pour les trois cas

Il est naturel de penser que si la quantité d'échantillons disponibles était infinie, nous finirions bien un jour par obtenir un processus, et donc une connaissance à 100 %.

Nous y parviendrions effectivement tôt ou tard mais, dans un souci de rentabilité, l'important est de réduire au maximum la durée de la période de mise en production.

Par ailleurs, la question de la quantité de microcomposants disponibles est secondaire car la surface d'un wafer est importante et le coût d'un microcomposant reste modique, quasiment négligeable. A titre d'exemple, on peut aisément obtenir trois microvaches sur un millimètre carré, et avec des diamètres de wafers standards compris entre 100 à 300 mm (450 pour le plus grand jamais construit) ce sont près de deux cent mille Maghi disponibles avec un seul wafer.

L'objectif est donc double : il faut non seulement disposer d'une connaissance satisfaisante pour envisager une mise en production à grande échelle, mais aussi s'assurer que la période d'acquisition de cette connaissance et du déploiement du procédé de production restera d'une durée raisonnable. Ce sont ces deux grandeurs que nous analysons par la suite.

Afin de comprendre les résultats des simulations, nous allons visualiser l'évolution des grandeurs du réseau à travers des figures comportant six graphiques.

Ces présentations tridimensionnelles des résultats sont fonctions :

- du numéro du microcomposant simulé - maximum à 100 microcomposants -. Il s'agit de l'axe nommé « numTour » en raison du nombre de tours que le réseau de Pétri principal effectue pour chaque simulation, soit jusqu'à ce que tous les microcomposants soient consommés, soit jusqu'à ce que la connaissance atteigne 100%.
- et du numéro de la simulation - 100 essais simulés en tout, afin d'autoriser une analyse statistique -.

Les six graphiques nous informent sur l'évolution de la connaissance, du temps simulé ainsi que sur quatre compteurs enregistrant les réussites, les échecs, les reconfigurations et les réorganisations.

Les résultats bruts (selon l'ordre de sortie du réseau de Petri), naturellement obtenus « en vrac » puisque basés sur des tirages aléatoires, sont ensuite classés selon la finalité de l'observation. Nous disposons de trois points de vue pour les interpréter :

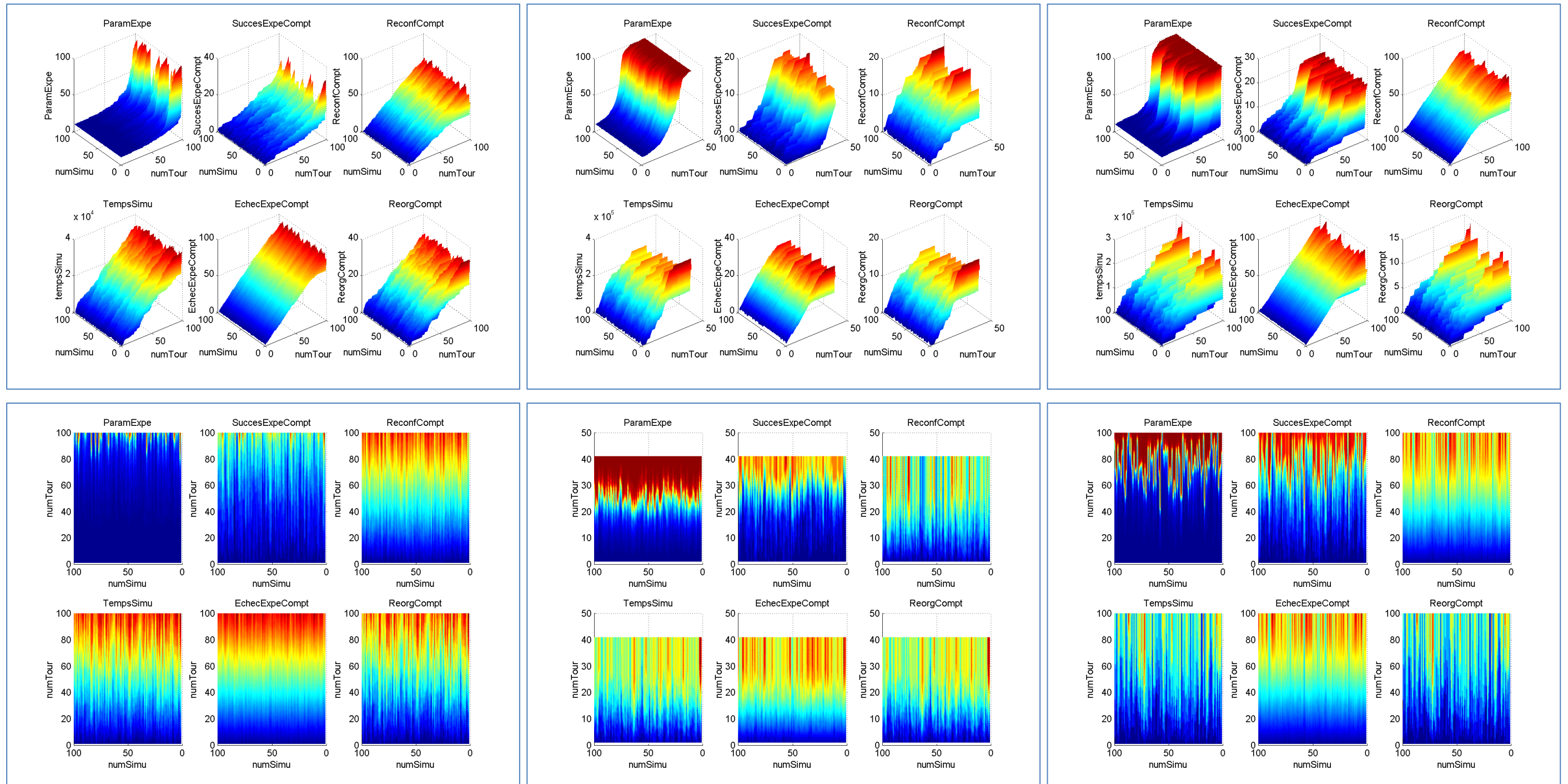
un premier en perspective cavalière - donne du relief mais cache certaines « vallées » -, un second orienté en vue de dessus - écrase le relief et l'échelle mais montre les vallées -, et enfin un mixte, en perspective dite frontale avec  $45^\circ$  d'élévation et  $0^\circ$  d'azimut, qui conserve le relief et montre les vallées, mais dont l'échelle est faussée.

Les trois figures suivantes présentent les résultats bruts des trois cas. Observons que la connaissance<sup>9</sup> dans le cas A n'atteint quasiment jamais son maximum à 100 % contrairement aux cas B et C. La connaissance atteint plus ou moins rapidement son niveau maximum en fonction des conditions initiales. Seules quelques simulations y sont parvenues pour le cas A avec les 100 microcomposants disponibles – il en aurait fallu plus -, alors que le cas B a nécessité un maximum de 40 microcomposants et la majorité des simulations du cas C parviennent à une connaissance de 100 % avec les 100 microcomposants disponibles.

Sur les graphiques tridimensionnels suivants, l'attention doit être portée à la graduation verticale, au maximum de 100 pour les compteurs et la connaissance, mais comptabilisant jusqu'à cinq décades de facteur d'échelle pour le temps de chaque simulation.

---

<sup>9</sup> La « connaissance » correspond au paramètre expérimental « ParamExpe » .



Cas A

Cas B

Cas C

## 4.25 – Visualisation 3D et frontale des résultats bruts des simulations des cas A, B, C

#### 4.2.3.2 Comparatif de l'aspect connaissance et analyse sur le savoir-faire

Les données [fig 4.26] sont classées non pas selon la valeur maximale atteinte pour la connaissance, mais selon l'intégrale de la connaissance pour chaque simulation ; cela évite les ex-æquo et distingue les comportements « en courbes convexes », lents à démarrer, de ceux « en courbes concaves », lents à terminer. Nous proposons deux vues pour analyser l'aspect connaissance : la vue en perspective isométrique, et celle en perspective frontale - voir page suivante -. Pour chaque cas, le graphique de référence est placé en haut à gauche parmi le groupe de six.

#### Conclusion :

Le cas A est assez hétérogène et, en moyenne, il n'atteint que 50 % de la connaissance en utilisant tous les échantillons de microcomposants. Il se produit une sorte de « léthargie » de la connaissance que nous appelons le « marais » par opposition au « plateau » - montagneux – atteint à 100 % de connaissances.

Le cas B est le plus efficace du point de vue de la consommation de microcomposants car, pour toutes les simulations, il lui en a fallu au plus une quarantaine pour atteindre 100 % de réussite – et donc de connaissances -. Nous constatons une assez bonne répétabilité de l'évolution de la connaissance lors des simulations

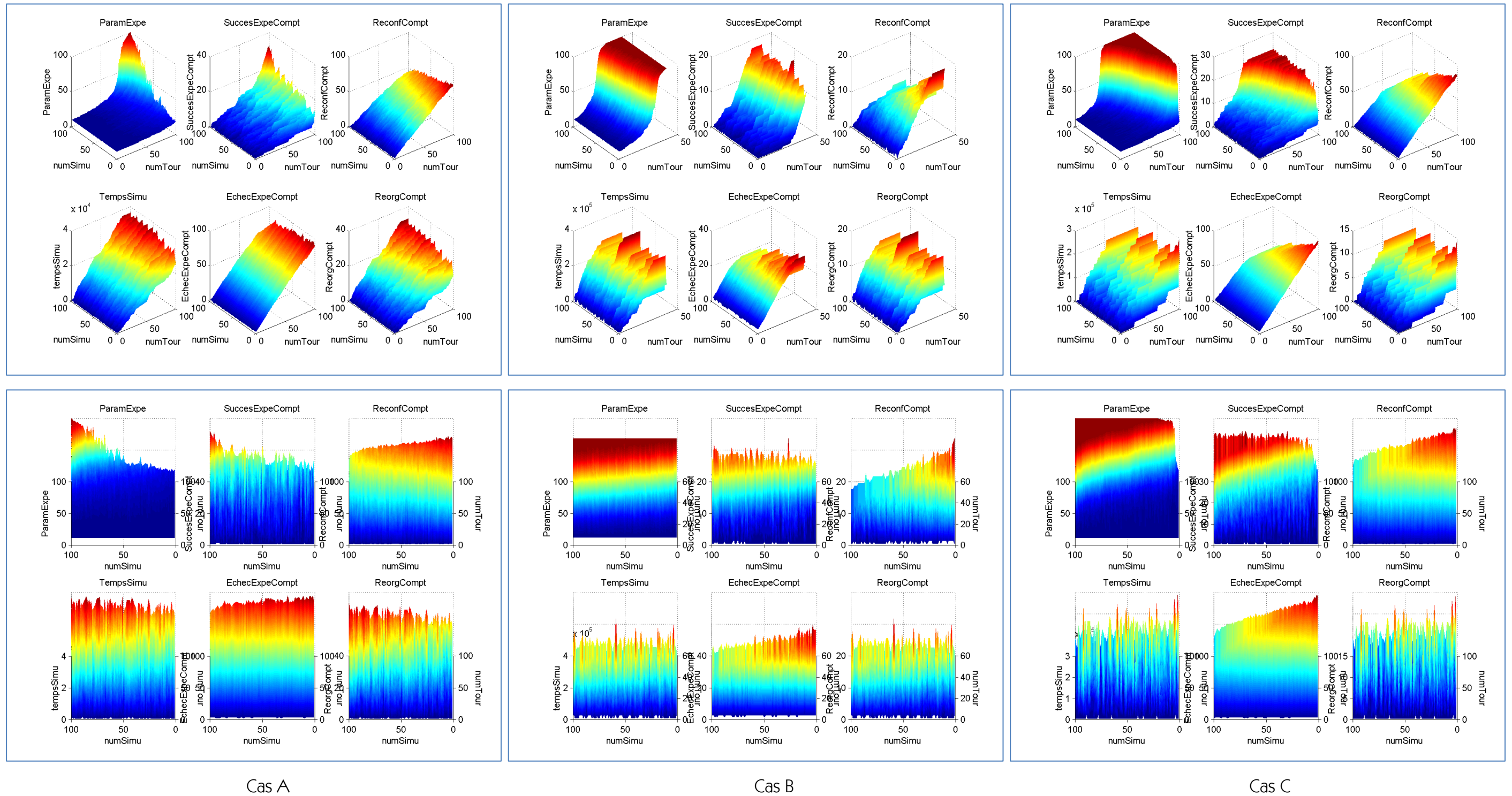
Le cas C parvient lui aussi à 100 % de connaissances pour quasiment toutes les simulations, mais il a requis entre 50 et 100 échantillons.

Il est cohérent d'observer que plus les succès se produisent tôt, plus vite la connaissance s'accroît et, par conséquent, atteint un niveau élevé.

Entre les cas B et C (rappelons que B est 5 fois plus curieux que C), alors que le plus curieux était estimé moins efficace (de 5 points) en cas de réorganisation, il se révèle beaucoup moins gourmand en microcomposants (60 % d'économie). Mais nous allons voir le revers de cette médaille d'ici peu.

Par ailleurs, en étudiant les compteurs de reconfiguration et de réorganisation, nous vérifions aisément que la curiosité a bien été respectée par le réseau de Petri avec une correcte proportion des quantités de reconfigurations et réorganisations.





4.26 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par connaissance

#### 4.2.3.3 Comparatif de l'aspect temporel et analyse temporelle

Pour chaque cas le graphique de référence est maintenant celui en bas à gauche parmi le groupe de six - voir page suivante -. Les données sont classées selon la valeur maximale atteinte pour la durée de la simulation d'un lot de microcomposants.

##### Conclusion :

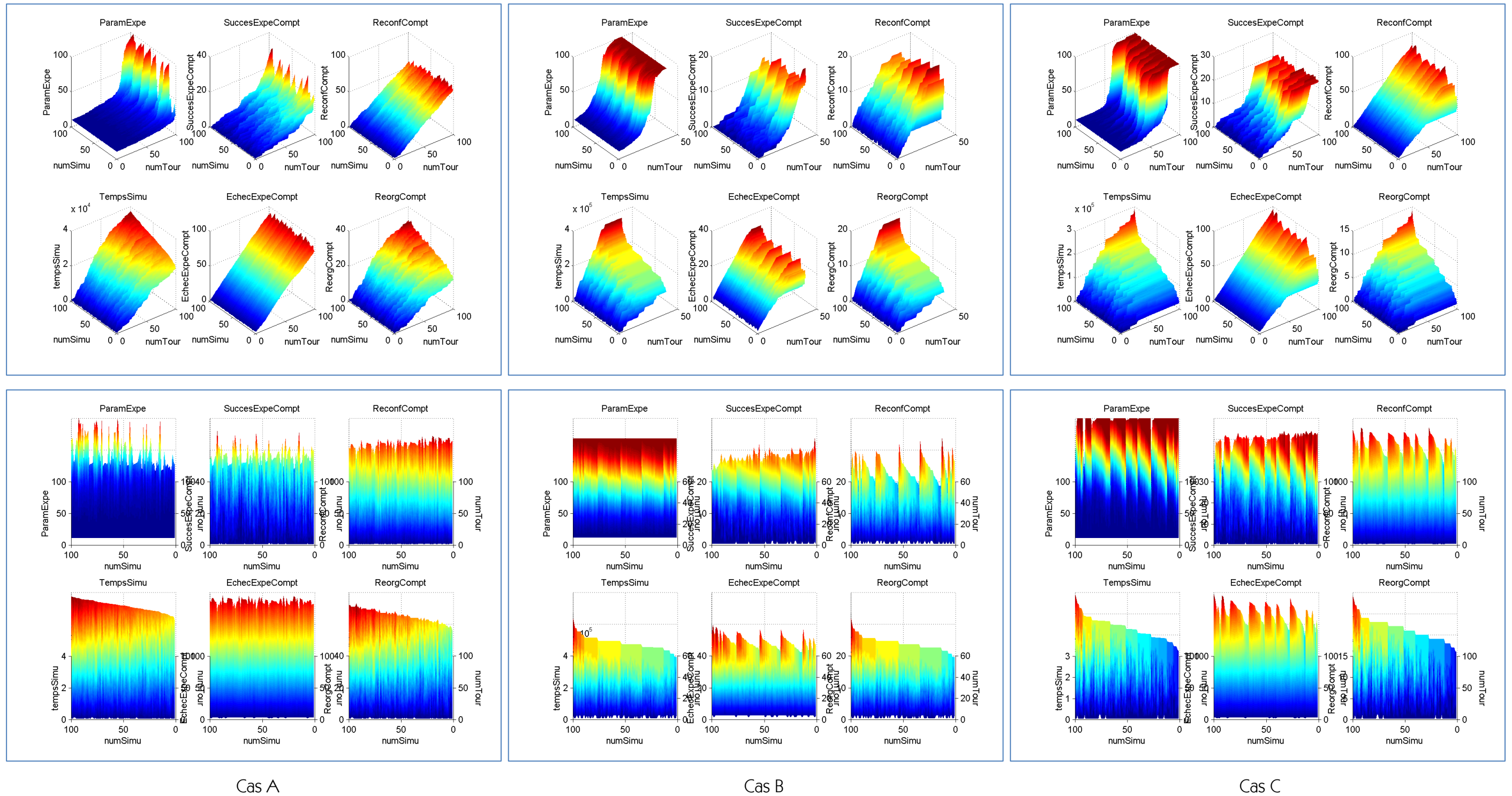
Globalement il y a un facteur dix sur les intervalles de durée relatifs au cas A [20 000 ; 40 000 minutes], et aux cas B [100 000 ; 400 000 minutes] et C [50 000 ; 300 000 minutes], à l'avantage de ce premier. Cela s'explique par l'hypothèse faite d'une importance chronophage pour la réorganisation dans les cas B et C – de deux mois contre deux jours pour le cas A - ; nous retrouvons le facteur dix introduit dans les conditions initiales. D'une manière plus générale, nous observons une corrélation quasi-parfaite entre le profil du graphique de compteur de réorganisation et celui de la durée ; les retards dus aux expérimentations et reconfigurations sont peu perceptibles.

Du point de vue des ordres de grandeurs :

- le cas A nécessite entre deux et quatre mois de campagne, les « rapides » réorganisations permises par l'absence de programmation de code automatisé sont décisives ;
- il faut entre dix et quarante mois – trois ans et demie - de travail pour le cas B, soit en moyenne deux années, plus ou moins une pour les cas extrêmes (les moins probables) ;
- le cas C met entre cinq et trente mois - deux ans et demi - pour atteindre 100 % de compétences, soit en moyenne un an et demie, plus ou moins une pour les cas extrêmes (les moins probables).
- Cas B vs cas C : Bien que moins curieux – 10 % contre 50 % -, les réorganisations plus efficaces de cinq points pour le cas C que pour le B permettent un gain de temps de près de 30 % - quatre mois de gagnés en moyenne sur vingt-deux mois de durée moyenne -. Cette tendance suit une certaine logique puisque moins de réorganisation sont nécessaires pour le cas C, plus efficace. Cependant il n'en est pas de même de la consommation en microcomposants qui, nous l'avons vu lors de l'analyse du savoir-faire, nécessite entre vingt et soixante pourcent de moins pour le cas B – avec 40

---

contre 50 à 100 pour C -. Moins de curiosité signifie plus de reconfiguration et donc d'échecs car ayant moins de connaissance.



4.27 – Visualisation 3D et frontale des résultats de simulations des cas A, B, C classés par durée

#### 4.2.3.4 Conclusion sur les simulations

Au vu de ce travail, force est de constater que, dans les cas B et C, les réorganisations ayant échoué sanctionnent fortement l'apprentissage car elles sont lourdes de conséquences temporelles. Cependant, ces mêmes cas B et C générant plus de connaissances que le cas A, cela nous amène à considérer avec intérêt l'efficacité nécessaire des réorganisations fortement prospectives.

C'est d'autant plus intéressant que, malgré des durées plus importantes pour le cas C - prévisible car plus curieux -, les simulations ayant abouti à un haut niveau de connaissance ont des durées proches de celles du cas B.

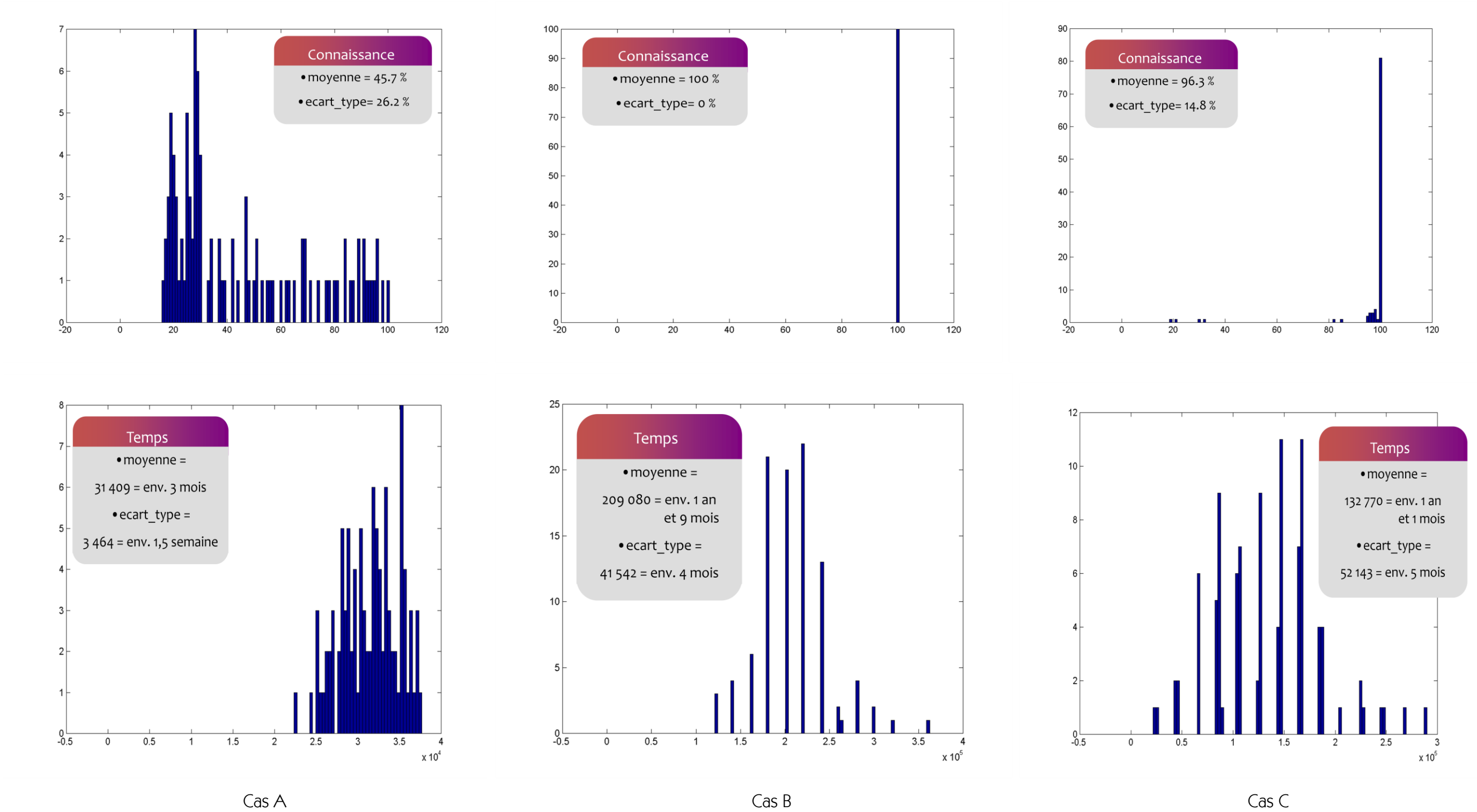
Nous avons enfin étudié la répartition statistique des résultats de simulations des trois cas afin de confirmer la tendance moyenne due aux conditions initiales, et dépendante d'un double tirage aléatoire. Il s'avère (figure 4.28) qu'avec la centaine de simulation pour chacun des trois cas, les résultats obtenus tendent à suivre une loi d'évolution Gaussienne. Cette observation est plutôt rassurante puisque nous simulons des influences de phénomènes physiques naturels et qu'ils sont généralement de nature Gaussienne, mais nous ne perdons pas de vue que seules les expérimentations seront en mesure de confirmer le modèle.

A la lumière de ces résultats de simulations relatifs à l'évolution temporelle de la connaissance d'une micro-usine, nous observons que, malgré la présence de deux tirages stochastiques de transitions, l'évolution est globalement assez franche.

La connaissance est naturellement croissante mais deux zones se distinguent :

- celle que nous appellerons le « marais » dans laquelle il est possible de s'enliser durant de nombreuses expérimentations infructueuses. Il faut tout de même relativiser car il y a aussi des leçons à tirer d'un échec ;

celle ascendante – sigmoïdale, comme attendue - qui témoigne d'une nette progression et qui sera d'autant plus rapide à atteindre que la connaissance initiale et la progression acquise à chaque réussite seront grandes. Il est ainsi conseillé d'aborder un nouveau cahier des charges de production par une micro-usine à partir de l'expérience acquise lors des campagnes antérieures. Plus il y aura de similitudes, plus la convergence sera rapide.



4.28 – Visualisation des répartitions statistiques des résultats de simulations des cas A, B, C



Pour faciliter l'interprétation des résultats de simulations et en déduire des tendances, rappelons que nous avons choisi de considérer la connaissance comme finie - à travers un pourcentage que l'on atteint à 100%, idéalement -.

Dans les faits, et tel que présenté en introduction à ce chapitre, souvenons-nous de la faible probabilité pour que cette connaissance soit pleine et entière dans un cas général. Nous préférons utiliser ici le mot « probable » car nous gardons intimement l'espoir que la Communauté scientifique parvienne à éclairer et modéliser les comportements physiques et naturels du micromonde tel que cela se fait actuellement pour les efforts de capillarité et tension de surface [[LamP03](#)].

Dès lors qu'il devient impératif de prospecter quasiment « en aveugle », du point de vue de l'efficacité et de l'ergonomie, peut-être serait-il utile d'ajouter un indicateur de « moral de l'opérateur », car, face à de trop nombreux échecs, il se peut qu'un découragement s'ensuive.

Il est donc important, d'une part de former au maximum les opérateurs pour leur permettre assez rapidement de parvenir à des réussites, et d'autre part, de les inciter à la curiosité.

Le système d'organisation possèdera un certain niveau d'intelligence et assistera l'opérateur mais l'efficacité de la réflexion humaine restera déterminante – pour combien de temps encore ? -.

Cependant, la condition est telle que cela va à l'encontre des principes habituels de reconduction d'un savoir-faire transmis, acquis à travers une formation traditionnelle. La pédagogie actuelle de la réussite ne peut pas s'appliquer ici car il faut développer une capacité à produire de nouvelles compétences.

Il appartient à l'opérateur ainsi qu'à la micro-usine de proposer de la nouveauté, d'innover. Il s'agit pour l'un comme pour l'autre de faire preuve d'originalité, peut-être même d'audace, d'opiniâtreté pour persévérer malgré des échecs successifs – la micro-usine doit s'y essayer à travers son système d'organisation -.

Ce comportement intellectuel a déjà fait ses preuves. Il nous rappelle une expérience professionnelle vécue avec une équipe d'étudiants de l'INSA-Strasbourg lors de la conception d'un drone-miniature. Après quatre années de développement, l'appareil présenté à un concours était différent de ceux de toutes les autres équipes. Sorte de bi-plans aux winglets jointifs, il s'est avéré très stable en vol et extrêmement robuste



de par sa continuité structurelle et sa construction en composite-carbone, au point de pouvoir « atterrir tel un aigle en chasse qui roule comme un judoka ». Cette solution, pour le moins originale, a fortement surpris et même plu au jury d'experts qui ne pouvait que constater son efficacité aéronautique.

Sur un aspect méthodologique, il sera judicieux de s'appuyer sur les techniques d'aide à la résolution de problèmes, telle la méthode TRIZ et ses nombreux outils. Il sera cependant peut-être nécessaire de faire évoluer ces outils avec la physique particulière du micromonde.

Finalement les compétences requises pour un opérateur sont celles que l'on met en œuvre lors d'une démarche de recherche, dans laquelle il faut explorer, défricher là où personne ne s'est jamais aventuré.

### 4.3 Vers une implémentation des modèles en vue du pilotage

- Extension à l'application sur stations -

Après avoir simulé des scénarii d'évolution relatifs à la connaissance d'une micro-usine confrontée à une nouvelle fabrication et montré le réalisme du concept proposé, il s'agit de permettre la migration des modèles de fonctionnement des divers constituants de la micro-usine vers un système opérationnel.

Dans le cadre du projet PRONOMIA de micromanipulation en milieu liquide, réalisé au sein de l'équipe SAMMI du département AS2M du laboratoire, il a été conçu et développé par David Hériban, conjointement à nos travaux, une interface de pilotage ouverte et modulable [Hér07]. Cette interface logicielle baptisée AP2M pour « Application pour le Pilotage de MicroManipulations » a été pensée dans le but d'offrir à l'opérateur une grande facilité d'utilisation tout en lui conférant un maximum de possibilités.

La flexibilité attendue pour permettre les reconfigurations et les réorganisations nécessaires à une micro-usine a été le cœur du développement.

A partir d'une fenêtre principale, l'opérateur est capable de configurer une station de télé-opération par la création de modules de pilotage qui sont des images des modules physiques réels présents dans l'architecture matérielle.

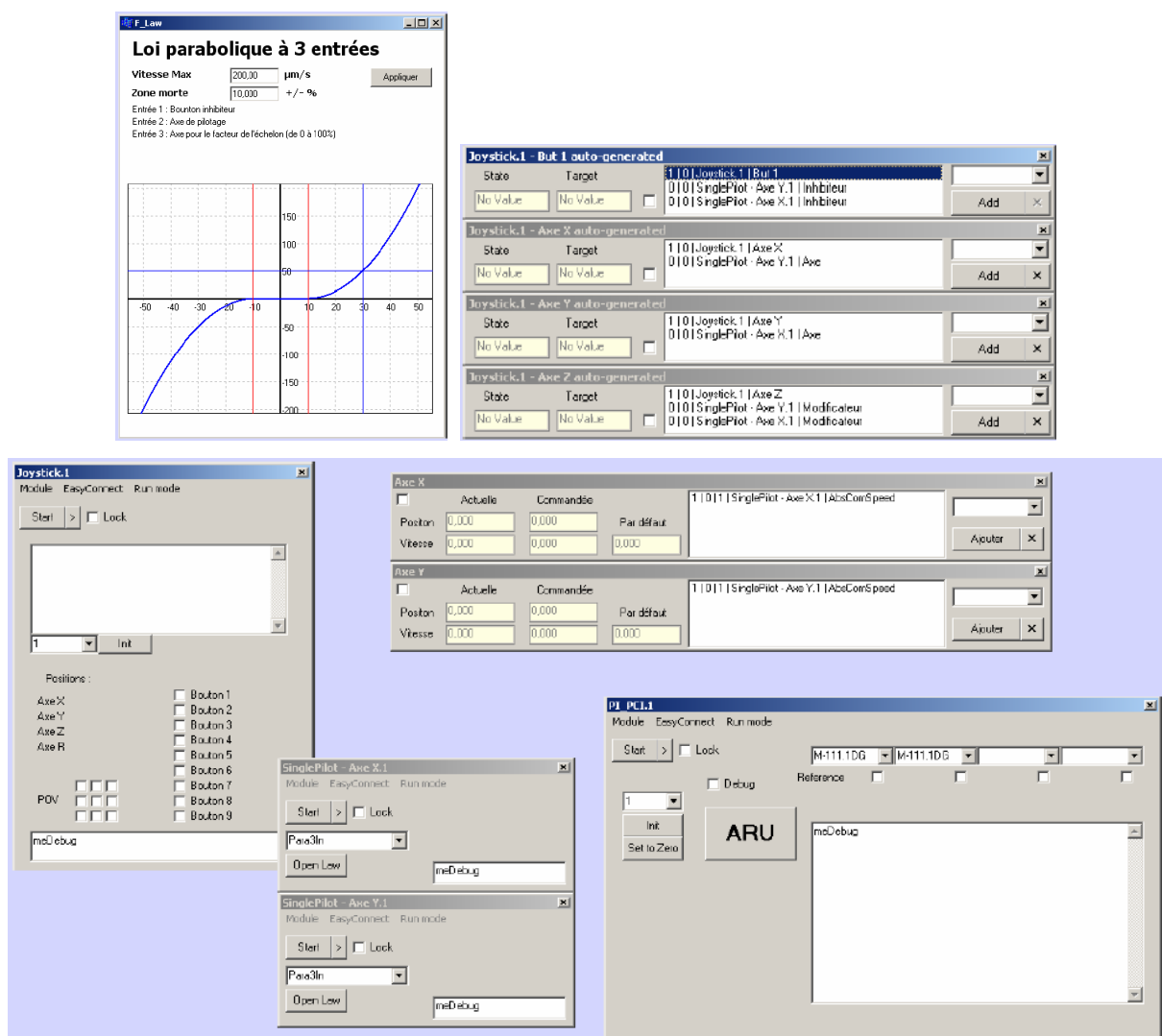
A l'écran, chaque module dispose d'une fenêtre de configuration dans laquelle sont définies ses caractéristiques intrinsèques et surtout ses liens avec les autres modules. L'ensemble des fenêtres propres au matériel mis en œuvre par la micromanipulation forme à l'écran une station virtuelle amenée à évoluer au fur et à mesure des apprentissages et de l'évolution des savoir-faire. Basée sur une architecture développée en Programmation Orientée Objet - POO -, les diverses entrées-sorties de l'IHM, ainsi que les entrées-sorties de terrain au sein du micromonde - partie opérative - sont encapsulées dans des fichiers de type Librairie de Liens Dynamiques « .dll » - Dynamic Library Link ou Bibliothèque de Liens Dynamiques -. Cette dll peut contenir du code ou des ressources rendus alors disponibles à d'autres applications.

Ainsi, selon la configuration matérielle de la station de « micromanipulation par télé-opération », la fenêtre d'application principale charge les dll adéquates. Au-delà du gain d'espace mémoire utilisée, cette technique permet de dissocier

géographiquement et temporellement la conception d'un module de la génération de l'application principale.

Un avantage non négligeable de cette solution est la mutualisation possible des développements réalisés par diverses personnes à partir d'un canevas commun, base standard de multiples développements.

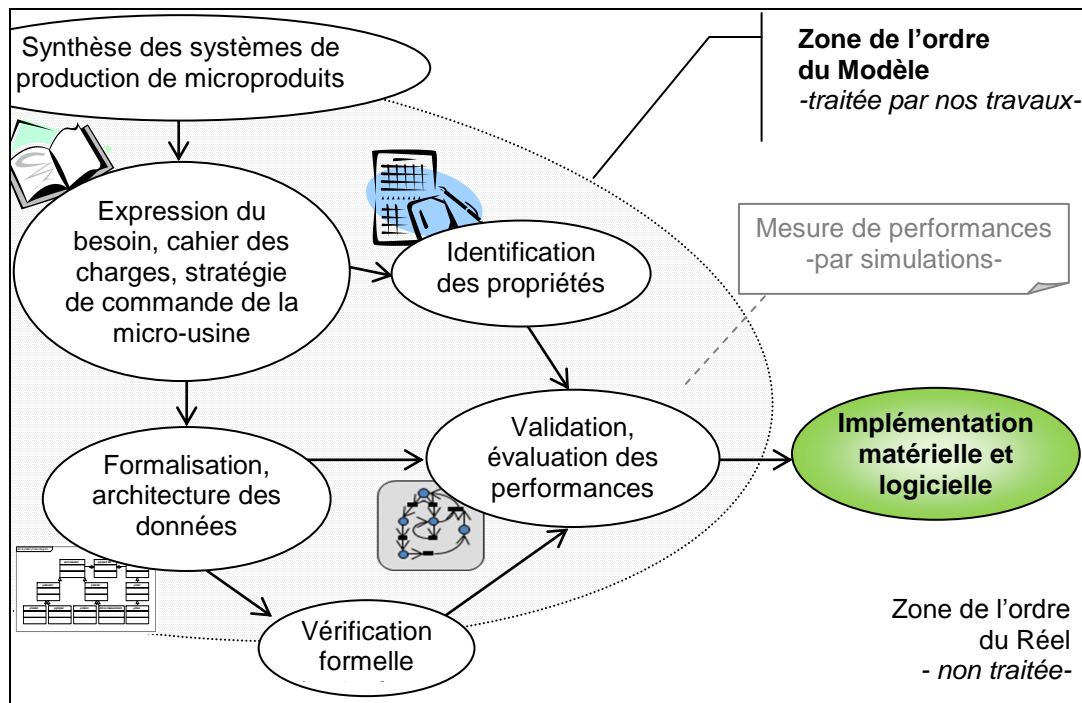
Par ailleurs, l'application principale de base permet une standardisation des interfaces de pilotage au-delà d'un laboratoire comme le nôtre. Ce dernier a initié le déploiement de l'AP2M sur plusieurs nouvelles stations, mais également lors de mise à jour d'autres moyens de prototypage.



4.29 - Illustration de l'interface graphique de l'AP2M

La finalité initiale de ce logiciel AP2M est l'association des organes d'IHM - de télé-pilotage : manette, vues sur écrans - avec les organes du micromonde - actionneurs et capteurs -.

Cette télé-opération n'est qu'une étape nécessaire au développement du concept de micro-usine automatisée, car, en complément de l'IHM, il faut expérimenter le système d'organisation complet, exploitant les savoir-faire acquis antérieurement. Cette dernière étape d'implémentation fait l'objet des prochains travaux menés conjointement par notre laboratoire et la jeune société « percipio-robotics » fondée par David Hériban [Hér] et en cours d'incubation à la Maison des microtechniques de la Technopole Microtechniques et Scientifiques de Besançon - TEMIS -.



4.30 - Méthodologie de travail, étape d'implémentation

#### 4.4 Conclusion sur la mise en œuvre de la validation

La validation présentée a consisté à quantifier les aptitudes des principales propriétés attendues - de connaissance et de durée -. Ces résultats, obtenus par simulation via un réseau de Petri stochastique et T-temporisé, sont relatifs à des conditions initiales identifiées à travers les expérimentations de terrain, menées en micromanipulation et micro-assemblage par les acteurs majeurs du LEA Microtechnique. L'indéterminisme du micromonde est simulé par la probabilité de tir de deux transitions. L'évolution chronologique - principalement influencée par les expérimentations, les reconfigurations et les réorganisations successives - est reflétée par trois temporisations de transitions.

Il ressort de ces simulations que le système organisation et l'opérateur doivent tous deux être aptes à prendre des décisions afin de couvrir de larges prospections, en persévérant malgré des échecs successifs.

De nouveaux savoir-faire seront acquis à partir d'une autonomie décisionnelle garante d'initiatives complétant les connaissances antérieures. Des volontés de réorganisation dépendent la durée d'établissement d'une gamme de production, mais surtout la fiabilité de cette gamme. Les simulations ont montré qu'il était nécessaire de s'autoriser quelques sacrifices temporels, pour suffisamment approfondir la connaissance de la (des) micromanipulation(s) et du(des) micro-assemblage(s), et ainsi réduire l'apparition des aléas imputables à la physique du micromonde.

L'implémentation de ces modèles de fonctionnement est la prochaine étape de développement, notamment à travers l'interface de pilotage AP2M. Elle sera un premier pas vers l'automatisation de l'organisation des cellules et, plus généralement, de la micro-usine.

L'assistance à l'organisation de la gamme intervient en amont ; elle est complémentaire à l'automatisation locale des cellules de production – e.g. grâce à l'asservissement visuel -.

## 5. Conclusion générale

Les trois parties qui composent ce travail de thèse ont permis d'établir une structure de micro-usine et de son système d'information, ainsi qu'une stratégie de commande.

Nous avons été en mesure de formaliser une architecture des données et d'identifier les critères d'évaluation de la modularité selon les propriétés attendues.

La simulation de l'évolution de la connaissance par réseau de Petri stochastique et T-temporisé nous informe sur le comportement à venir des futurs déploiements de micro-usines. L'incertitude inhérente au micromonde a été prise en considération par l'évolution stochastique, d'autant moins importante que, dans une situation donnée, la connaissance et les savoir-faire s'accroissent. Les durées relatives des reconfigurations ou réorganisations, pénalisantes car d'autant plus chronophages, sont bien prises en compte par l'évolution au gré des expérimentations grâce à la T-temporisation du réseau de Petri.

Dans un objectif de conception orientée objet, le langage de modélisation graphique UML a permis d'établir les modélisations dont une analyse syntaxique est autorisée.

Enfin, techniquement, l'outil de simulation utilisé PACE - IBE Simulation Engineering GmbH - a permis de mener cette étude avec le modèle mathématique discret du réseau de Petri. SMALLTALK, langage orienté objet et interprété, a été utile pour programmer les transitions des réseaux afin de les rendre stochastiques et de temporiser l'exécution du modèle.

Par ailleurs, l'interface graphique de l'utilisateur représente un précieux soutien pour assurer une lisibilité tout en gardant une grande souplesse dans l'évolution des paramètres d'entrées-sorties des simulations. Les volumineux résultats de simulation ont pu être sauvegardés puis efficacement mis en forme et analysés grâce à MATLAB.

## 5.1 Conclusion technique

L'approche modulaire est pertinente au vu de nos résultats, et le choix de décomposition assure de bonnes performances à une ligne de production par micromanipulation et micro-assemblage, relativement à la connaissance et à l'évolution temporelle.

Pour autant, nos travaux nous apprennent que les décisions prises au début d'une campagne d'expérimentations par un micro système de production sont décisives à deux niveaux.

D'une part, et c'est le moins gênant, la quantité limitée de microcomposants disponibles pour une série - sur un nombre fini de wafers – peut se révéler insuffisante à l'exploration de divers scénarii de production, notamment en raison des échecs expérimentaux qui consomment des microcomposants devenant des rebuts.

D'autre part, la durée de mise en service est décisive quant à la démocratisation du concept.

En conséquence, il s'agit de faire les bons choix dès le début de la prospection : ne pas persévérer sur trop de reconfigurations - tentantes par leur rapidité -, mais prendre le temps de prospecter à travers quelques réorganisations - plus efficaces -, et surtout mettre à contribution les connaissances acquises antérieurement. A ce titre, la personnalité d'un opérateur est décisive - en attendant qu'il soit relayé par un système d'organisation suffisamment autonome et intelligent -.

Avec le simulateur développé, nous disposons d'un outil de prévision destiné à accompagner les prochaines étapes de conception de micro-usines. Les réglages de conditions initiales accessibles sur le pupitre du simulateur permettront d'affiner les résultats à travers des campagnes à venir intégrant la structure du système d'organisation lorsqu'il aura été développé.



## 5.2 Perspectives

Pour notre simulateur, le réseau de Petri reste descriptif et ne prend pas en considération la structure de la micro-usine, à savoir l'implantation des cellules et le fonctionnement du système d'organisation.

L'utilisation simultanée de plusieurs cellules à proximité les unes des autres s'avère être une source potentielle d'aléas du micromonde au sein de la micro-usine en fonctionnement.

En effet, l'influence entre cellules a son importance et trois exemples illustrent aisément de telles situations :

- en premier lieu, un système de transfert piézoélectrique [[Par08](#)] va générer des vibrations qui peuvent se transmettre aux cellules voisines et les perturber ;
- en second lieu, l'atmosphère d'une cellule requérant une faible humidité (pour éviter des effets capillaires contraignants lorsqu'il faut lâcher un microcomposant) observerait une augmentation de son taux d'humidité si une cellule voisine travaille en immersion aqueuse et utilise par exemple un préhenseur à glace [[LoW08](#)] ;
- enfin, l'usage indispensable de la vision au sein des multiples cellules - a priori, pour la télé-opération et les asservissements visuels - peut se révéler complexe à étalonner en raison des éclairages de scène, nécessaires à son bon fonctionnement [[BerJ07](#), [Tam08a](#)]. Les multiples éclairages peuvent parasiter les CCD des cellules voisines, de même que d'éventuelles lampes à flash utilisées pour la polymérisation lors de micro-assemblages par collage.

Nous avons principalement insisté sur les fonctions de gestion des flux – d'information, d'énergie, de microcomposants – à assurer par la PFPM.

Mais, concernant l'implantation des cellules, il faut être certain de son aptitude à filtrer ces multiples nuisances. La PFPM va, à elle seule, exiger une grande attention de la part des concepteurs de micro-usines afin d'offrir robustesse et sûreté de fonctionnement des cellules.

Le développement du système d'organisation intégrant une gestion efficace de la connaissance forme l'étape suivante car la taille des bases de données générées est

amenée à croître très fortement. Il s'agira alors non seulement de stocker et traiter correctement l'information, mais également de savoir la restituer à bon escient. Ainsi, un important travail reste à accomplir sur la connaissance et le pronostic d'organisations.

Ces deux perspectives de génération-gestion de la connaissance et de sûreté de fonctionnement sont l'occasion d'impliquer l'équipe COSMI<sup>10</sup> du département AS2M dans la finalisation de la micro-usine. Cette équipe œuvre déjà à la conception modulaire appliquée dans le mésomonde à l'architecture d'un produit et à l'organisation de projet.

En outre, soulignons la continuité de nos travaux avec ceux menés au LIFC par Sekou Diakité, doctorant, sur « l'ordonnancement pour la micro-usine » et également par Hala Sabbah sur le thème « Conception, dimensionnement et pilotage d'une micro-usine » qui a présenté, en mars 2009, sa thèse intitulée « Modélisation et dimensionnement d'une plate-forme hétérogène de services ».

Ces travaux sont effectués avec et grâce au soutien de Jean-Marc Nicod, Maître de Conférences - HDR -, sous la responsabilité du Professeur Laurent Philippe.

[[Dia07](#), [Dia08a](#), [Dia08b](#), [Dia08c](#), [Dia09](#)]

---

<sup>10</sup> COSMI : COncption et Sûreté de fonctionnement des systèmes MécatronIques

## 6. Annexes

### 6.1 Annexe 1 : Tableau de critères d'évaluation

Le tableau suivant recense les critères d'évaluation selon les constituants de la micro-usine et les propriétés de modularité destinés à assurer une production performante.

Cette annexe est présentée dans le [§ 3.5] où sont détaillés les cas de deux constituants représentatifs : l'unité « cellule » et l'unité « PFPM ».

CRITERES  D' EVALUATION		Constituants										
		Système d' Organisa- tion	Système d'Information (flux d'information)	unité "Plate-Forme de Production de Microproduits"	PFPM constituée de cellules	unité "Cellule"	Cellule constituée d'éléments	Module Matériel Elémentaire	Élément Actif	Élément Passif	Module de Commande Elémentaire	Environ- nement
Description		pilotage		3 flux "IEM": information, énergie, µcomposants	communication PFPM-celluleS (structure interne de PFPM)	3 flux "IEM": information, énergie, µcomposants	communication cellule-élémentS (structure interne de cellule)		AP2M compatible (/ ddl)			
		Conceptuelle		physique ; accueil des cellules		physique		physique				

Propriétés de la modularité	Reconfigurer (le plus léger)	chgt possible en cours de production	plug & produce, re-paramètrable	plug & produce, re-paramètrable	/gain flux ; transferts µcomposants /infos : + débit de données	plug & produce en un temps stocha, re-paramètrable,	inhiber, utiliser, reparamétrer les éléments actifs, ajouter, enlever les éléments passifs (caractéristiques différentes),	plug & produce, re- paramètrable	plug & produce, re-paramètrable	plug & produce	Reparamè- trage	Reparamè- trable	périphériques d'E/S plug & produce (AP2M compatible)
	Réorganiser (le plus lourd)	chgt possible après une production	plug & produce	plug & produce	Temps de changement de cellules ; aptitude aux connexion- déconnexion	définition des E-S IEM (en "dehors" de la PFPM, sur Zone PFExpérimentation)	réinitialisable, ré- étalonnable (calibration) temps de changement d'éléments	ré-utilisable	ré-utilisable, calibrable	ré-utilisable	Reparamè- trage	reparamèt- rable	périphériques d'E/S plug & produce (AP2M compatible)
	Monter	/	/	plug & produce	aptitude à la mise en position & connection de cellules	accessibilité, interfaces standards info, énergie, mécanique)		inter- compatibilité	inter-compatibilité	inter-compatibilité	gestion des E-S	compatibilité	périphériques d'E/S plug & produce (AP2M compatible)
	Démonter	/	plug & produce	transportable (dans coffre)	Liaison complète non permanente (si liaison mécanique)	Stop & unplug		/ par principe (module)	/ par principe (module)	/ par principe (module)	/ par principe (module)	"enlevable"	périphériques d'E/S plug & produce (AP2M compatible)
	Modifier	adaptatif	"redondance"	implantation non permanente	Accessibilité et disponibilité	modularité, reparamètrage		reparamètrage	reparamètrage (soft) ou physique(matériel)	reparamètrage (soft) ou physique(matériel)	Reparamè- trage	Reparamè- trage	multi E-S
	Partager	structure hétérarchique	entre sys d'orga & opérateur, inter-cellules et inter-µusines	gestion de priorités		être multi tâches, voire multi microcomposants		facile à dupliquer	facile à dupliquer	facile à dupliquer	facile à dupliquer	globalisation	télé-pilotage multi- opérateurs

	Répartir	multiples supports d'organisation	multiples supports d'information	flux auto-gérés		si tâche dissociable		si entre deux cellules	si entre deux cellules	si entre deux cellules	si entre deux cellules	segmentation	télé-pilotage multi-opérateurs
	Evolutif (pour être Adaptable)	mise à jour possible (orienté objet)	standardisation (e. g. Ethernet)	standardisation (matériel et soft) pérennité de l'accueil des µtechno	taux d'occupation en volume de la PFPM	modularité, re-paramétrable	taux de "constituants reprogrammables"	accessibilité aux "sources"	reparamétrage	multi-design	accessibilité aux "sources"	reparamétrable, réglable	standardisation (matériel et soft)
	Acquérir des connaissances	enrichissable	mise à disposition de diverses données	pérennité		intelligence embarquée localement		structure des données correspondantes	structure des données correspondantes	structure des données correspondantes	identification	précision de mesure	enregistrement dans bases de données
	Accéder à l'information	Standardisation (e. g. Ethernet)	standardisation (e. g. Ethernet)	standardisation (p.e. Ethernet)		Présence de divers microcapteurs		connection	interne par connection	externe sans contact	par variables globales	contrôle de paramètres	périphériques d'E/S plug & produce (AP2M compatible)
	Générer de nouveaux savoir-faire	auto-adaptatif	/	dans la gestion des flux, le choix des implantations (/conditionnement µcomposants)		curiosité et taux de progression		structure des données correspondantes	structure des données correspondantes	structure des données correspondantes	"robustesse" adaptable	taux d'impact	assistance (ordres de haut niveau)
	Transférer : flux de µcomposant (s) et de µproduit(s)		Suivi permanent des µcomposants et µproduits (Physiquement non concerné)	compatibilité avec différents types de conditionnement : %. % de pertes de µcomposants.		« sas » d'entrée-sortie à prévoir, Synchronisation-coordination inter-cellules.	présence stocks amont-aval	/	/	/	/	généralisation à la PFPM (pour transfert µcomposants)	
	Produire	Observé grâce aux indicateurs		temps de présence sur le site		temps de production & indicateurs de prod							
	Etre rapide	Selon l'intelligence	Protocole (+ ou – rapide)	Transfert (µcomp & informations) Intégration de cellules		Saturation des éléments et efficacité de l'apprentissage							
	Etre flexible	Apte à l'évolution		Mobilité des cellules	Interfaces adaptées, temps de changement de production	Eléments constituants & logiciels interchangeables	interfaces adaptées						
	Etre accessible matériellement	connectique (p.e. RJ45)	connectique (p.e. RJ45) ou wireless	connectique (e.g. RJ45) ou wireless (/ IEM)		constituants démontables, présence d'ouvertures		précision de position	précision de position	précision de position	localement ou déporté	gestion locale ou globale	ergonomie du "poste de télépilotage"
	Etre de qualité	Mémoirisation de l'historique	Certification iso	Certification iso		Certification iso		Certification iso				Nuisance, pollution	
	Etc.												

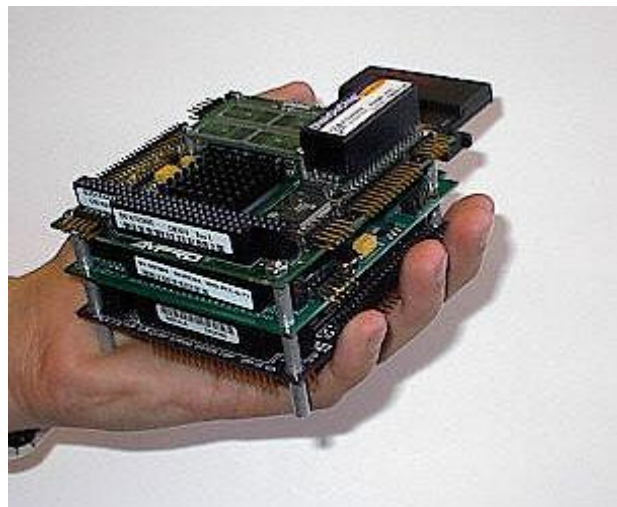
## 6.2 Annexe 2 : Les supports techniques disponibles

Le choix d'un système d'information physique, localement au niveau de chaque cellule, dépend fortement des avancées technologiques et de l'aptitude à l'intégration de ces technologies.

A ce jour, la solution la plus souple pour le développement d'un système d'information adapté s'appuie sur un ou plusieurs ordinateurs en réseau, afin de partager les tâches - vision, asservissement, supervision, IHM, gestion des connaissances, etc. -. L'interface utilisateur d'un ordinateur avec ses écrans, clavier, souris, joystick est directement accessible et ne nécessite pas particulièrement de grandes aptitudes techniques. La communication peut être confiée à diverses technologies que nous allons présenter ici de manière non exhaustive.

### Le PC embarqué tel que le PC/104

Un consortium a créé une norme d'ordinateur embarqué appelée PC/104. Son nom lui vient de la définition de son architecture autour d'un bus composé de deux connecteurs, l'un de 64 points, l'autre de 40, soit un total de 104 connections. Ainsi, tout s'organise autour d'une carte mère, d'un module d'E/S et d'un convertisseur A/N. Le bus, sa taille et sa consommation sont imposés, contrairement au micro-processeur qui peut varier d'un modèle à l'autre - même si la famille x86 est très présente -. Une telle architecture d'ordinateur débouche sur des applications non pas domestiques ou de bureautique, mais industrielles ou militaires pour acquérir des données puis les traiter relativement rapidement dans un contexte de contrôle-commande. La compacité de sa dimension - moins de 10x10 cm<sup>2</sup> - et l'aptitude à l'empilage de carte laisse augurer de possibles applications pour une micro-usine, compte tenu du concept de cellules de production modulaires de dimensions similaires.



**6.1 – Vue d'un PC/104 avec triple empilage**

### Carte avec OS temps réel

Il est impossible d'effectuer instantanément des opérations informatiques. Cependant lorsque l'exécution d'une commande est suffisamment rapide pour ne pas perturber la dynamique d'un processus physique contrôlé, on définit la notion de système temps réel.

Le respect de la contrainte temporelle est donc tout aussi essentiel que la justesse du résultat obtenu. Pour qu'un système temps réel soit bon, il ne s'agit pas uniquement qu'il fournisse un résultat de calcul exact, mais il doit délivrer ce résultat dans le temps qui lui est imparti. De tels systèmes d'exploitation, « operating system » - OS -, sont présents dans de multiples secteurs d'activités. La production industrielle, les contrôles de processus chimiques et énergétiques, la robotique ou encore l'aéronautique, en sont friands. Le monde économique tient également à ce que les places boursières travaillent à temps pour assurer une synchronisation des opérations financières.

Pour développer un système d'exploitation temps réel, il s'agit que chacun de ses composants soit suffisamment rapide pour que, vu du système piloté, le temps de réaction soit inférieur à son temps de réponse. Pour ce faire, aucune application informatique ne doit tendre à ralentir inopinément l'exécution de ses consœurs internes au noyau de l'OS.

### Microcontrôleur

La partie matérielle qui accueille l'OS d'un automate est appelée microcontrôleur. Ce circuit intégré regroupe les composants, éléments essentiels à la constitution d'un ordinateur :

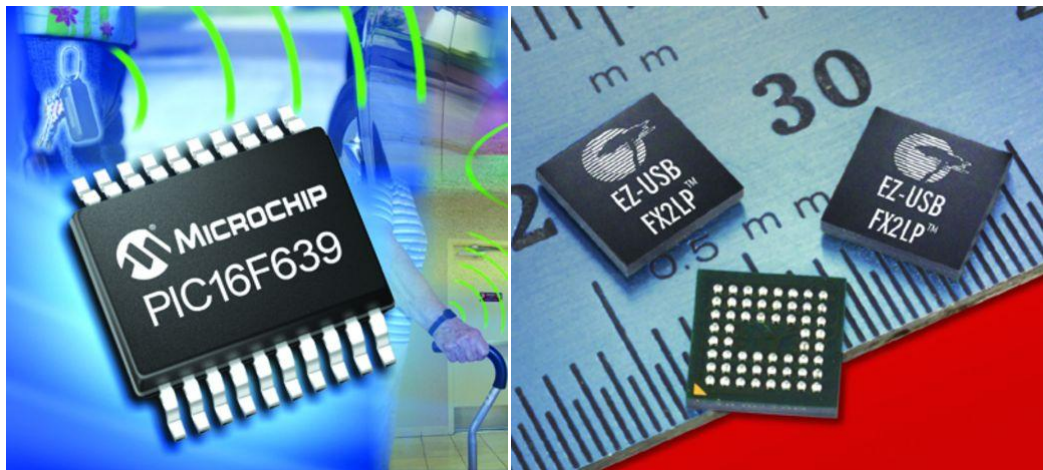
- le processeur qui va exécuter des instructions et traiter les données des programmes ;
- la mémoire morte, chargée de retenir les instructions formant le programme ;
- la mémoire vive qui évolue au gré des données ;
- quelques interfaces d'entrées-sorties - aussi appelées périphériques - ;

Un microcontrôleur intègre l'ensemble de ces constituants ; il est par conséquent moins gourmand en énergie et moins onéreux à la fabrication, mais il perd en rapidité d'exécution.



C'est principalement cette miniaturisation et cette intégration qui ont permis de démocratiser les systèmes électroniques autopilotés. Ce sont également ces propriétés qui justifient leur usage pour la micro-usine.

La vulgarisation de cette technologie a été fortement encouragée par la démocratisation de deux microcontrôleurs dans des applications pédagogiques de formation : Microchip a créé le « PIC » avec la série des 16Fxx et Freescale – anciennement Motorola - a développé son 68HC11, remplacé par les 68HC12 et 68HC08. Pour la micro-usine modulaire et une aptitude à être « plug and produce », la solution de la compact interface de chez Cypress EZ-USB FX2 de 5x5 mm<sup>2</sup> est très séduisante, et d'autant plus dans sa version LP – Low Power – compte-tenu de notre objectif énergétique.



6.2 – Vue de micro-contrôleurs

## FPGA

Un FPGA est un réseau programmable de portes logiques - Field-Programmable Gate Array -. La programmation intervient post-fabrication. Elle peut être définitive ou modifiée à souhait, via de nombreuses cellules logiques élémentaires assemblées selon le besoin. De tels circuits se retrouvent sous diverses appellations reconnaissables encore par les initiales PAL ou PLA - pour Programmable Logic Array -, PLD - pour Programmable Logic Device - parfois précédées de E ou C - pour Erasable ou Complex -. L'usage d'une appellation dépend principalement de la technologie adoptée : respectivement RAM pour les FPGA, FLASH pour les PLD, ou fusible pour les PAL.

Matériellement, l'architecture de certaines puces FPGA peut contenir de la mémoire, des fonctions d'horloge, ou encore des blocs DSP câblés - la technologie DSP est



détaillée dans le prochain paragraphe -. Ainsi les fonctionnalités particulières dont peuvent disposer certaines de ces puces sont :

- Un cœur de microprocesseur enfoui, dit hard core ;
- des mémoires supplémentaires souvent double-port et avec parfois un accès à la pile de type FIFO - First In First Out - ;
- des multiplieurs câblés ;
- des blocs multiplieur-accumulateur pour traitements DSP ;
- des blocs de resynchronisation ou synthèse d'horloges, dits PLL ;
- une reconfiguration partielle, y compris durant son fonctionnement - non-négligeable pour la micro-usine qui verra évoluer sa configuration -,
- un chiffrement des paramètres de configuration ;
- des liaisons mises en série à haut-débit des entrées-sorties grâce aux fonctions sérialiseurs / dé-sérialiseurs ;
- un contrôle numérique de l'impédance des entrées-sorties, supprimant ainsi une grande quantité de composants passifs sur la carte.

La constitution d'un bloc logique utilise habituellement une bascule - Flip-Flop en anglais- et une table de correspondance - LUT ou Look-Up-Table -. Cette LUT autorise l'implémentation d'équations logiques à quatre voire six entrées et une sortie. Cependant, il arrive que la LUT soit utilisée comme un multiplexeur, un registre à décalage voire une mémoire. La notion de registre consiste à retenir un état - logique séquentielle - ou à synchroniser des signaux - cas du pipeline -.

Une telle puce FPGA peut contenir quelques millions de blocs logiques. Ils sont connectés entre eux par une matrice de routage, configurable selon le besoin. Ainsi, le composant peut être reconfiguré à souhait, mais l'encombrement de cette fonction de routage est important sur le silicium et induit un coût élevé des FPGA. On utilise généralement l'adjectif « Manhattan » pour désigner la topologie du routage en référence aux rues du quartier de New-York qui se croisent perpendiculairement.

Compte-tenu de l'explosion de la quantité et de la densité de portes logiques qui n'autorise plus un routage manuel, un outil automatique de routage et placement a été développé. Il associe les ressources matérielles encore disponibles sur la puce et le schéma logique souhaité par le concepteur. Les résultats obtenus sont généralement satisfaisants en terme d'utilisation des ressources mais les

performances - déterminisme temporel - varient d'un routage à l'autre car elles dépendent de la longueur des liaisons inter-cellules.

Que ce soit pour le routage du circuit ou pour constituer les blocs logiques à interconnecter, les FPGA actuels utilisent principalement des cellules SRAM. Cette SRAM n'est autre que de la mémoire vive dite Statique - Static Random Access Memory – et elle utilise des bascules pour stocker les données. Mais la SRAM ne nécessite pas des rafraîchissements périodiques de son contenu, contrairement à la mémoire dynamique DRAM plus compacte en terme d'encombrement car composée d'un simple pico-condensateur et d'un transistor. Néanmoins, la SRAM doit être alimentée en permanence pour ne pas perdre définitivement les données mémorisées ; sa mémoire est dite volatile, tout comme pour la mémoire dynamique.

Puisque ce sont des mémoires volatiles qui enregistrent la configuration - le routage et les LUT -, alors le design du FPGA est obligatoirement sauvegardé dans une mémoire externe non volatile. Il s'agit souvent d'une mémoire Flash série, compatible avec le test de la carte à puce ainsi obtenue. Technologiquement, il arrive que la configuration soit enregistrée dans une EEPROM, supprimant ainsi l'usage d'une mémoire externe. Ce peut enfin être une technologie de configuration unique par anti-fusibles : une tension élevée « claque » un diélectrique, crée un contact et assure physiquement la programmation. Soulignons le fait que cette dernière technologie ne peut pas conduire à la reconfiguration du FPGA.



**6.3 – Vue d'un FPGA de chez Altera et sa multitude de connecteurs**

## DSP

Un DSP est un processeur de signal numérique ; Digital Signal Processor. Il s'agit d'un microprocesseur optimisé pour les calculs. Par conséquent, et cela justifie son appellation, son principal usage concerne le traitement numérique de signaux, le filtrage. A ce jour, l'usage des DSP se retrouve dans la plupart des appareils audio-vidéo.

L'architecture d'un tel processeur est optimisée pour permettre de complexes calculs, en un cycle d'horloge. Une autre fonctionnalité est celle de donner un accès aisé à un grand nombre d'entrées-sorties qu'elles soient numériques ou même analogiques. Une des principales fonctions disponibles dans un DSP est son usage pour des asservissements grâce à des calculs et filtrages : cette fonction consiste à multiplier

puis additionner et enfin stocker le résultat. Elle est d'ailleurs souvent appelée la fonction MAC. Contrainte à coordonner automatiquement divers éléments modulaires au sein des cellules de la micro-usine que nous développons, cette technologie est amenée à être mise en œuvre par nos développements temps réels.



**6.4 – Vue d'un DSP de chez Motorola et ses nombreux connecteurs**

### Quid de la biologie ?

On estime à plus d'un dixième de téra - cent milliards - les neurones interconnectés dans la constitution du système nerveux humain. En comparaison, le cerveau des fourmis compte environ cinq cent mille neurones. Attention cependant car les neurones peuvent différer par leur forme et certaines caractéristiques. Ils se répartissent en quelques classes principales. Par ailleurs, il faut noter que la position des neurones dans le cerveau a aussi une incidence sur leur comportement.

Un neurone se compose des trois éléments suivants :

- le corps cellulaire ; il regroupe le noyau du neurone et une machine biochimique permettant la synthèse d'enzymes. Il inclut également d'autres molécules vitales pour la cellule. La forme du corps cellulaire est pyramidale ou sphérique, et il mesure quelques microns de diamètre ;
- les dendrites ; elles sont les récepteurs des signaux qui arrivent à un neurone. Elles se composent de fines extensions de forme tubulaire et qui s'agglomèrent au neurone. Les signaux envoyés au neurone sont captés par les dendrites. Leur longueur ne mesure que quelques dizaines de microns ;
- l'axone ; il conduit les signaux qui sortent du neurone. Il est plus long que les dendrites et son extrémité est ramifiée pour se relier aux dendrites des autres neurones. Sa longueur peut s'étaler de quelques millimètres à plusieurs mètres.

Techniquement, le neurone se comporte comme une entité polarisée, et l'information ne se transmet que dans l'unique sens des dendrites - en entrée - vers l'axone - en sortie -.

Une synapse se situe à la jonction entre deux neurones. On la trouve principalement entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre neurone. Elles peuvent aussi assurer des liaisons entre axones - axo-axonales -.

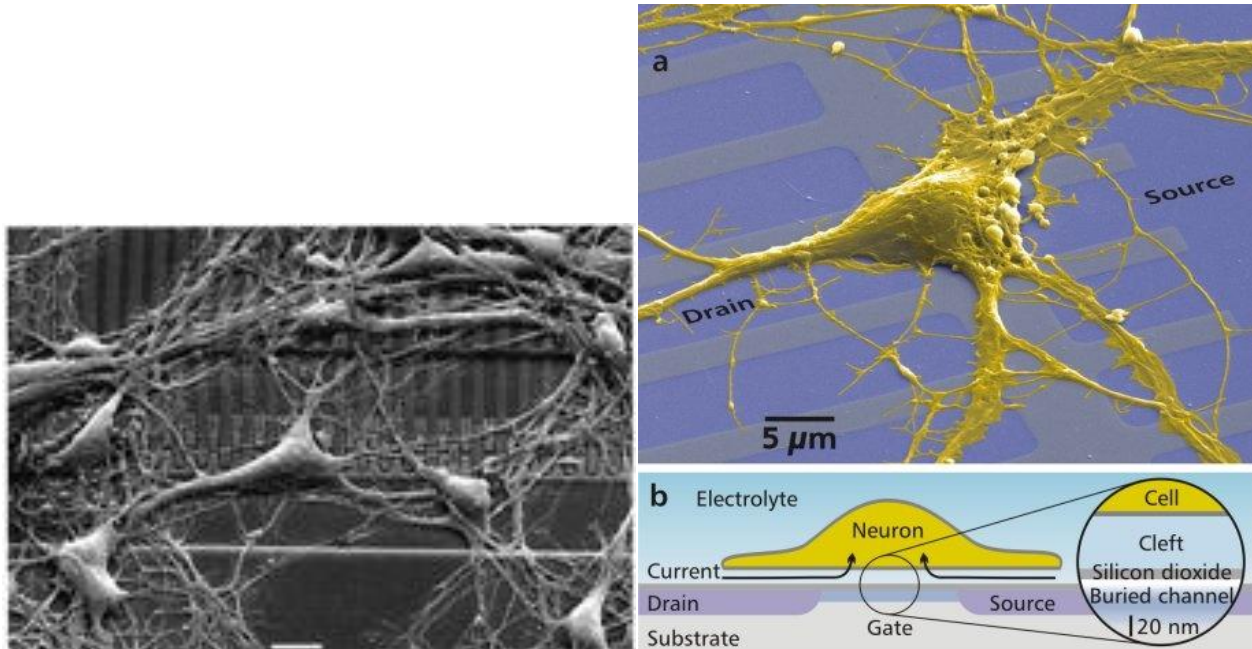
Ainsi les informations reçues par un neurone, en provenance d'autres neurones, sont perçues par ses dendrites. Les multiples informations décelées par les dendrites du neurone en question sont sommées et analysées dans le corps cellulaire. Grâce à un signal électrique, appelé potentiel d'action, le résultat de l'analyse suit alors l'axone dans sa longueur jusqu'à ses terminaisons synaptiques. Le signal arrivant ici, des vésicules synaptiques fusionnent avec la membrane cellulaire et autorisent la libération de neurotransmetteurs - médiateurs chimiques - dans la fente synaptique. La synapse ne permettant pas la transmission d'une information électrique, ce sont les neurotransmetteurs qui assurent le relais du passage des informations entre neurones, assurant une indépendance électrique un peu à la manière d'un opto-coupleur.

On rencontre deux catégories de neurotransmetteurs : les excitateurs et les inhibiteurs, qui autorisent ou interdisent à un nouvel influx nerveux de se propager. Les synapses, quant à elles, se modifient selon la répétition de leur activation ou non - leur histoire -. Elles ajustent ainsi leur fonctionnement et assurent une fonction mémoire qui, selon sa plasticité au passage des influx nerveux, va être à l'origine de mécanismes d'apprentissage.

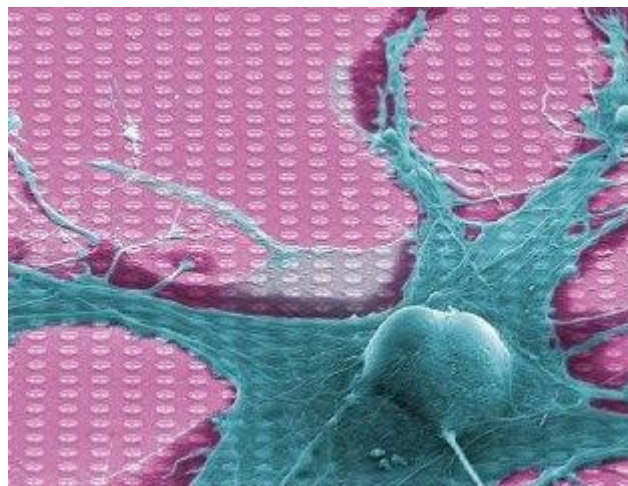
La différence majeure entre les fonctionnements d'un processeur et ceux d'un cerveau se situe au niveau de l'exécution des opérations en série pour le premier, et en parallèle pour le second. Ce parallélisme génère un gain de temps remarquable et donc une efficacité exceptionnelle au cerveau qui peut gérer simultanément un grand nombre de tâches, entre autres : déclencher plusieurs actions synchronisées, percevoir une sensation, éprouver des émotions, mémoriser, apprendre, décider, être attentif -en veille-, etc. Tout ceci, sans une grande consommation énergétique grâce à quelques régulations - en température et pression -, une alimentation équilibrée ainsi que de la motivation et du temps pour permettre un nouvel apprentissage.

En revanche, on observe que les principaux avantages de l'ordinateur face au cerveau manquent cruellement à l'espèce humaine pour être insensible à la fatigue, se réparer ou augmenter ses capacités par simple changement d'un composant, dupliquer des informations cryptées ou non.

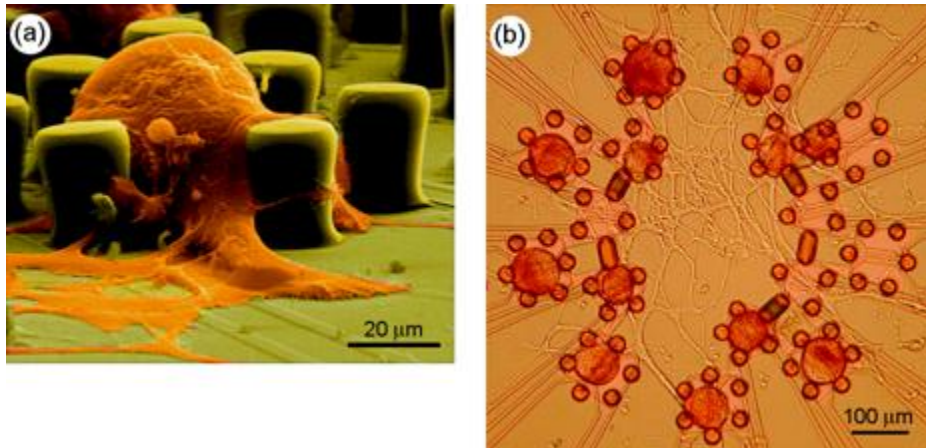
A l'heure actuelle, des bio-puces sont développées par l'équipe du Pr Peter Fromherz du laboratoire Max Planck [[Fro03](#)], mais leur finalité consiste plutôt en une assistance bionique suite à la perte d'une fonction biologique, par une sorte de prothèse intelligente.



**6.5 - Neurones de rat cultivés sur un réseau de transistors en silicium recouverts de poly-L-lysine. P. Fromherz, Max-Planck-Institute for Biochemistry / The Journal of Neuroscience**



**6.6 - Neurone de limace - *Lymnaea stagnalis* - posé sur la neuropuce mise au point par Infineon : 16384 capteurs au mm<sup>2</sup> enregistrent tout signal électrique émis par des neurones vivants.**



### 6.7 - Réseau de neurones mécaniquement stabilisé sur puce de silicium

(a) Micrographie électronique d'un neurone d'escargot immobilisé par un « piquet de clôture » sur un contact bi-routes après trois jours de culture.

(b) Micrographie d'un réseau avec des cellules neuronales organiques - taches sombres - sur un double cercle des contacts bi-routes avec les dendrites cultivées en zone centrale - filets lumineux -, après deux jours en culture.

Finalement, la précédente extrapolation d'une micro-usine immergée, voire basée sur la technologie du vivant, n'était que pseudo-délirante et il fort probable, comme le propose Bruno Jacomy - page 3 -, qu'une communauté scientifique fasse la jonction entre ces deux remarquables domaines de la biologie et des microsystèmes de production, d'ici quelques décennies ou même années au regard du rythme effréné des innovations scientifiques !

- Souhaitons que cette course au progrès nous ramène à un juste équilibre -.



### 6.3 Annexe 3 : Modèles UML supplémentaires

Nous proposons dans cette annexe quelques diagrammes supplémentaires que nous n'avons pas jugés utile d'intégrer directement dans le corps du document afin de ne pas surcharger son assimilation.

Le premier diagramme présenté permet un recensement des principaux cas relatifs à l'acquisition des spécifications de production (Fig 6.8).

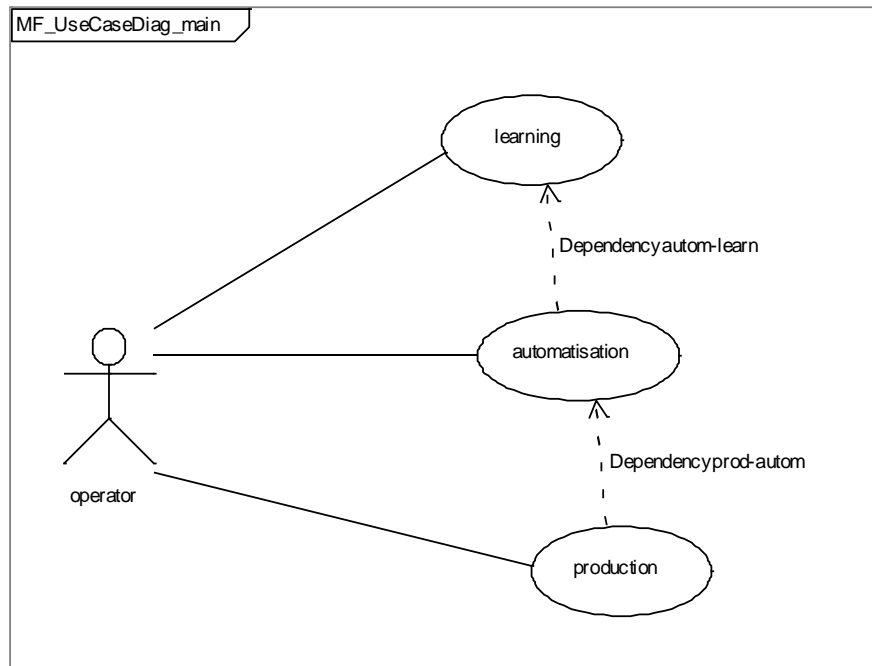
Le second diagramme présente une vue générale des principales classes qui composent la classe de gestion de l'organisation (Fig 6.9).

Un diagramme des classes (Fig 6.10) offre une description du système d'organisation, introduisant les opérations de base à satisfaire par le système d'information.

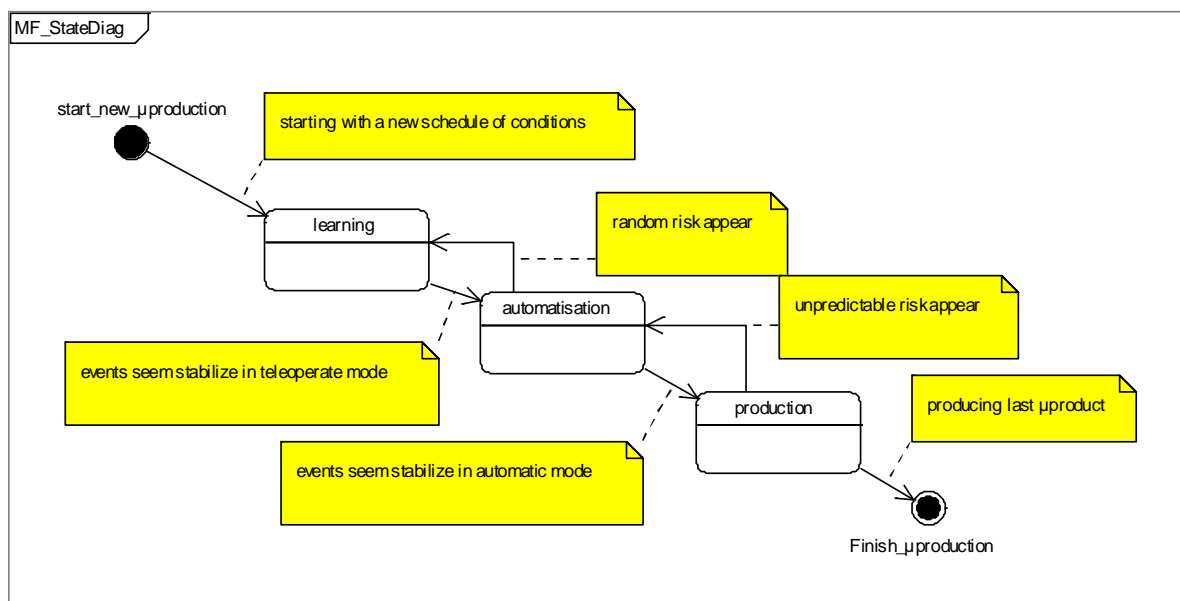
Enfin, le diagramme des classes (Fig 6.11) apporte une vue générale des principales classes de la micro-usine. Il donne par exemple une idée des attributs des classes associées au microproduit.

En outre, pour faciliter au lecteur l'accès à une vue globale de notre modèle UML, nous choisissons de reporter également dans cette annexe des duplicatas des modèles présentés au chapitre 3 - Définition du système d'information de la micro-usine -.

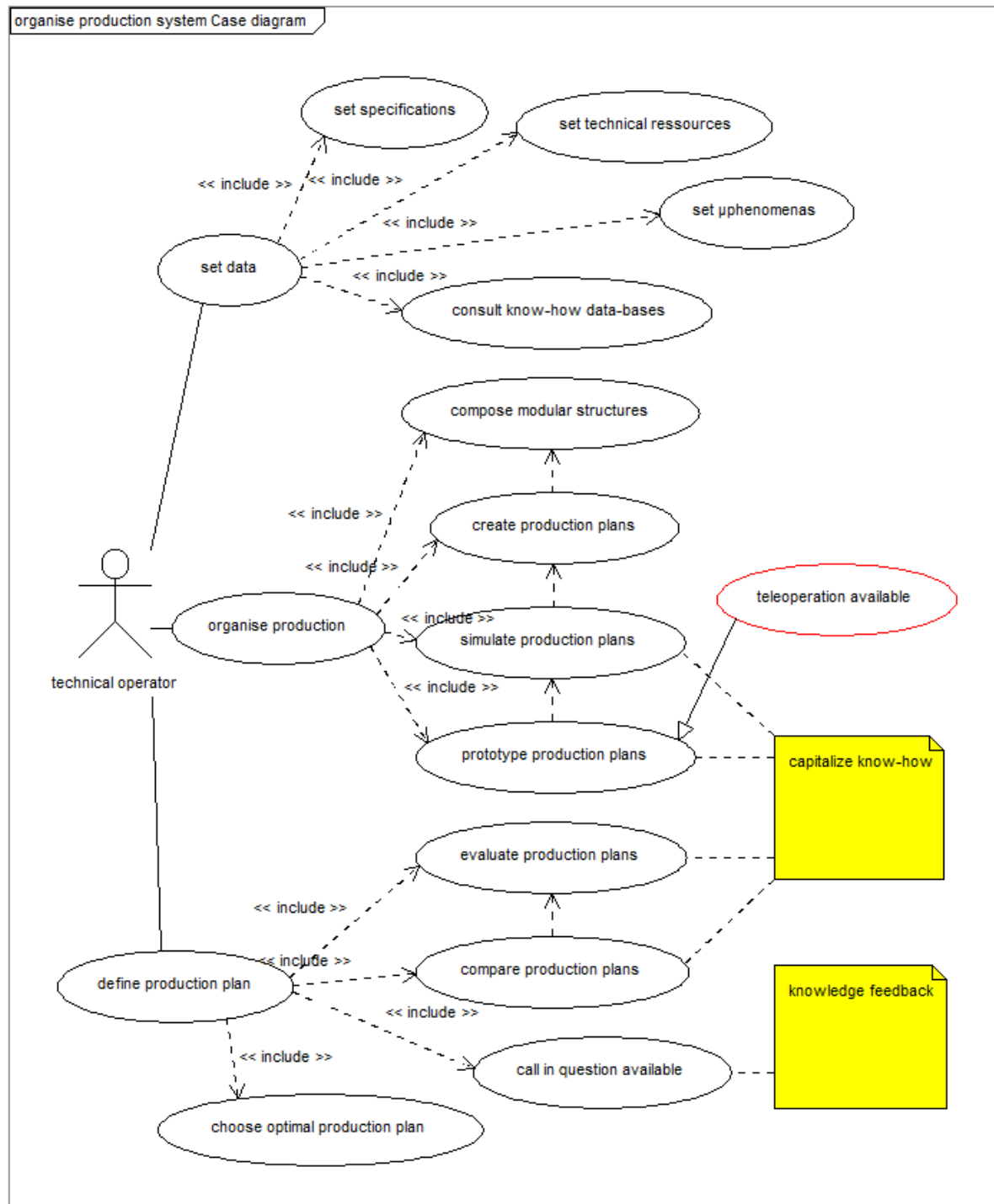




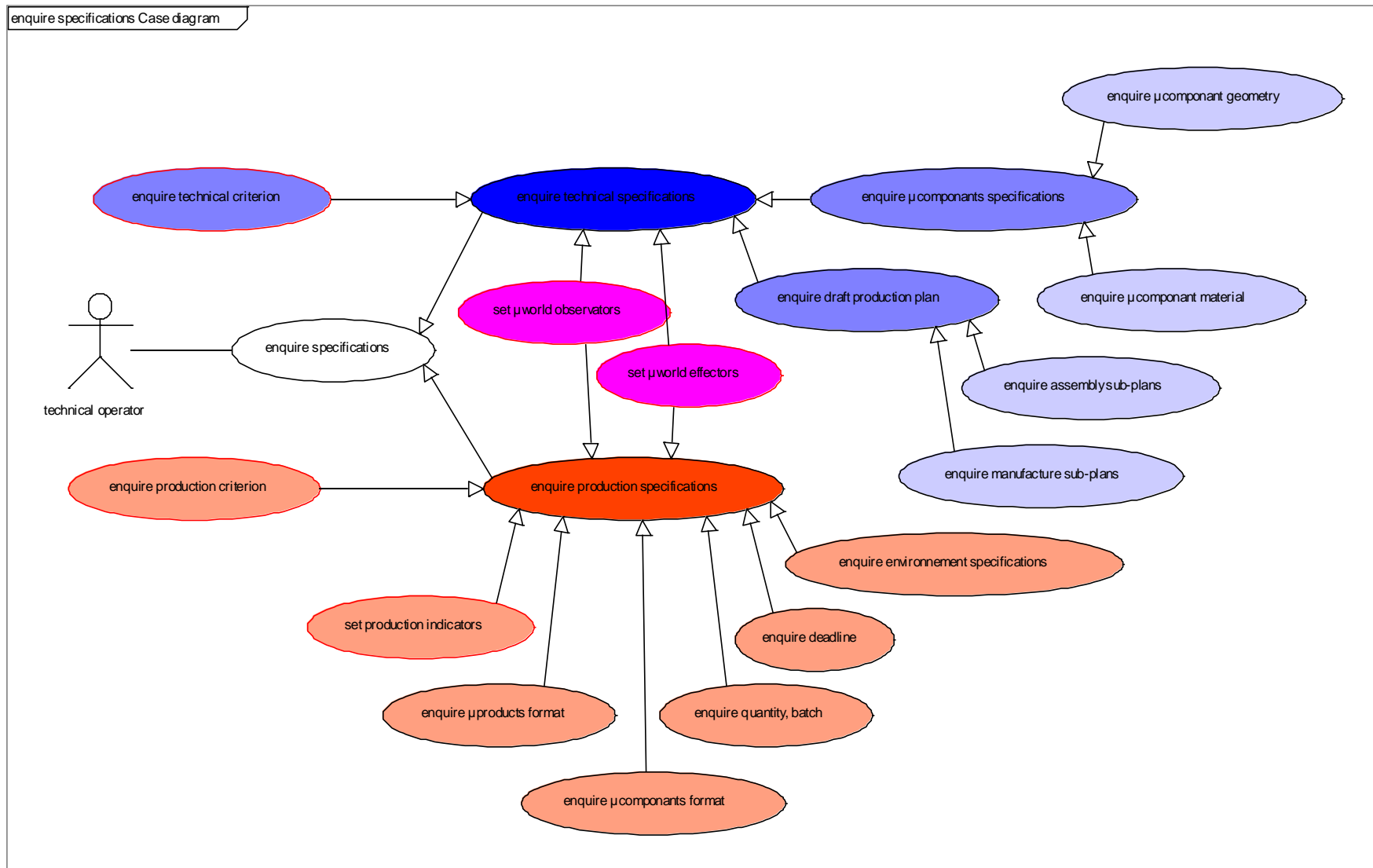
Duplicata Figure 3.9 - Diagramme principal des cas d'utilisation de la micro-usine



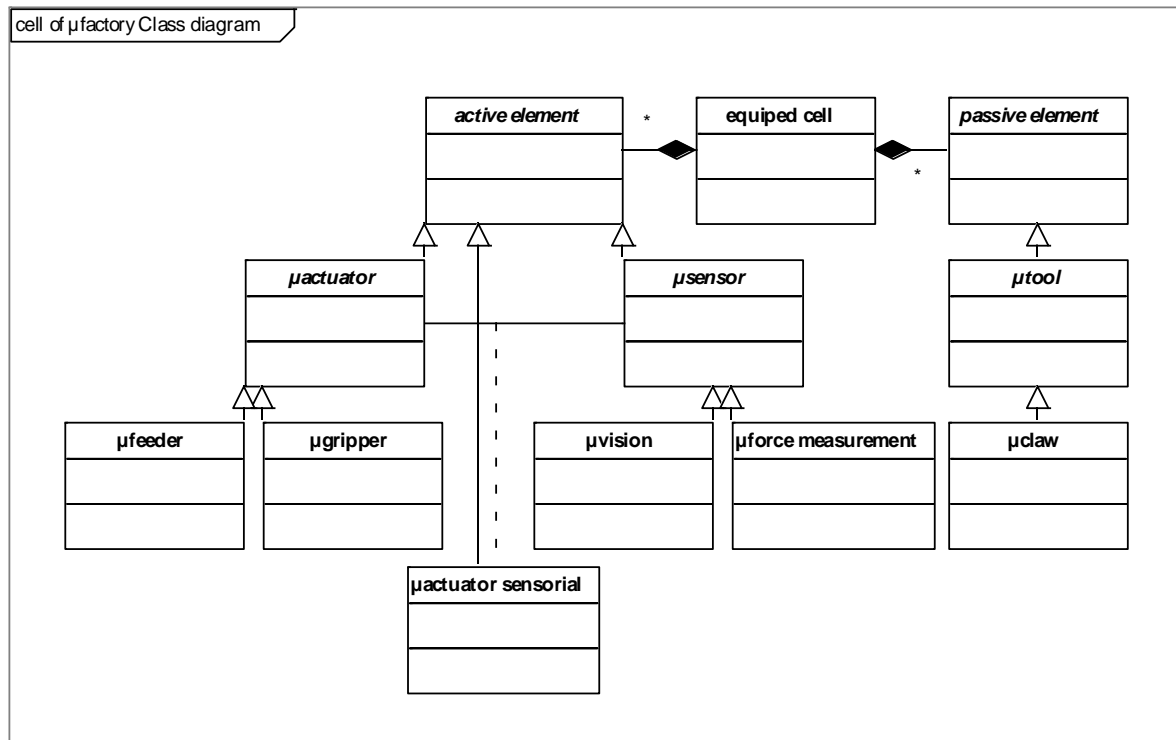
Duplicata Figure 3.10 - Diagramme d'état de la micro-usine par production



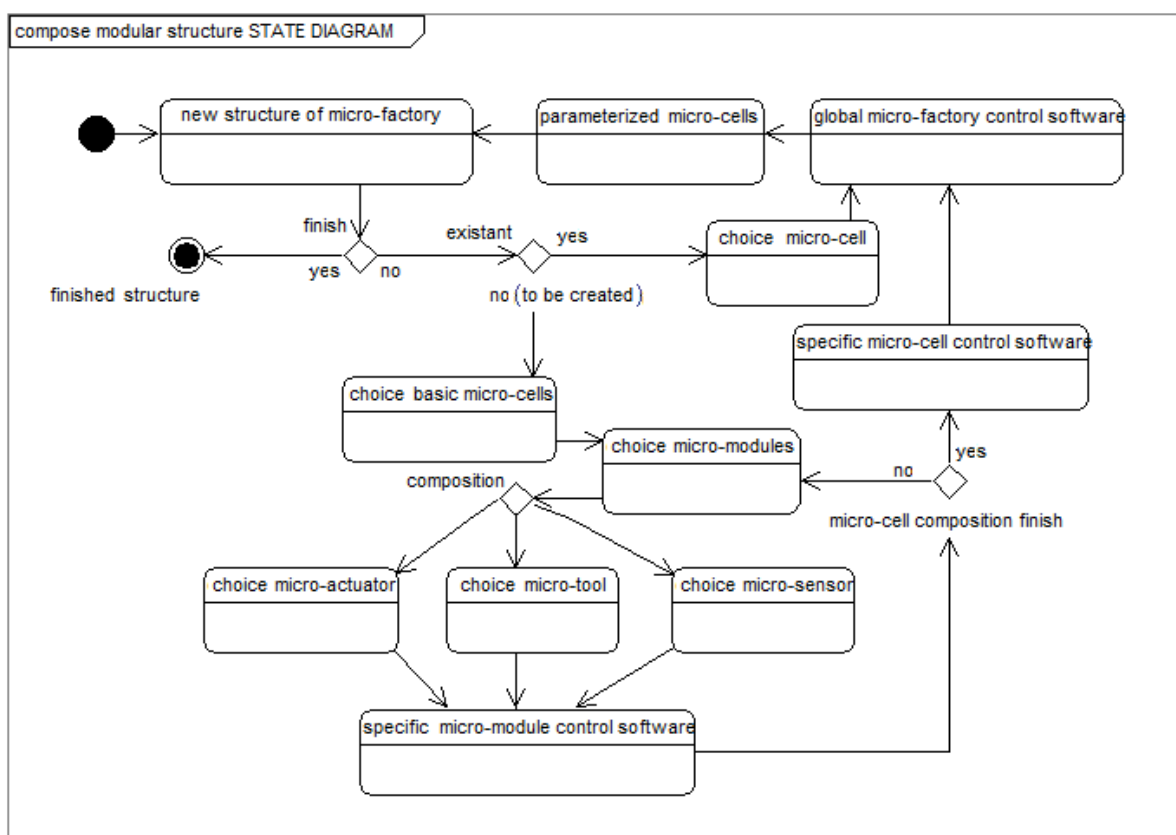
Duplicata Figure 3.11 - Diagramme des cas d'utilisation du système d'organisation de la production



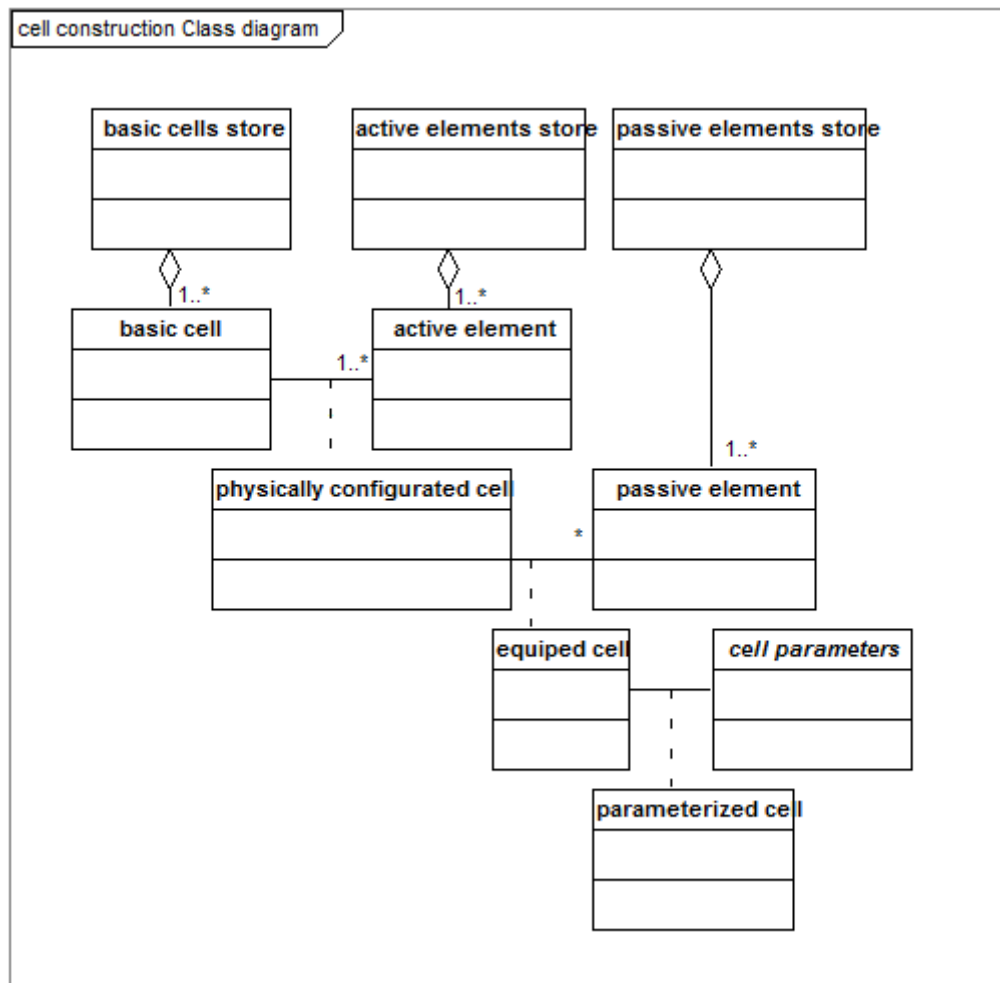
6.8 – Diagramme des cas relatifs à l'acquisition des spécifications de production



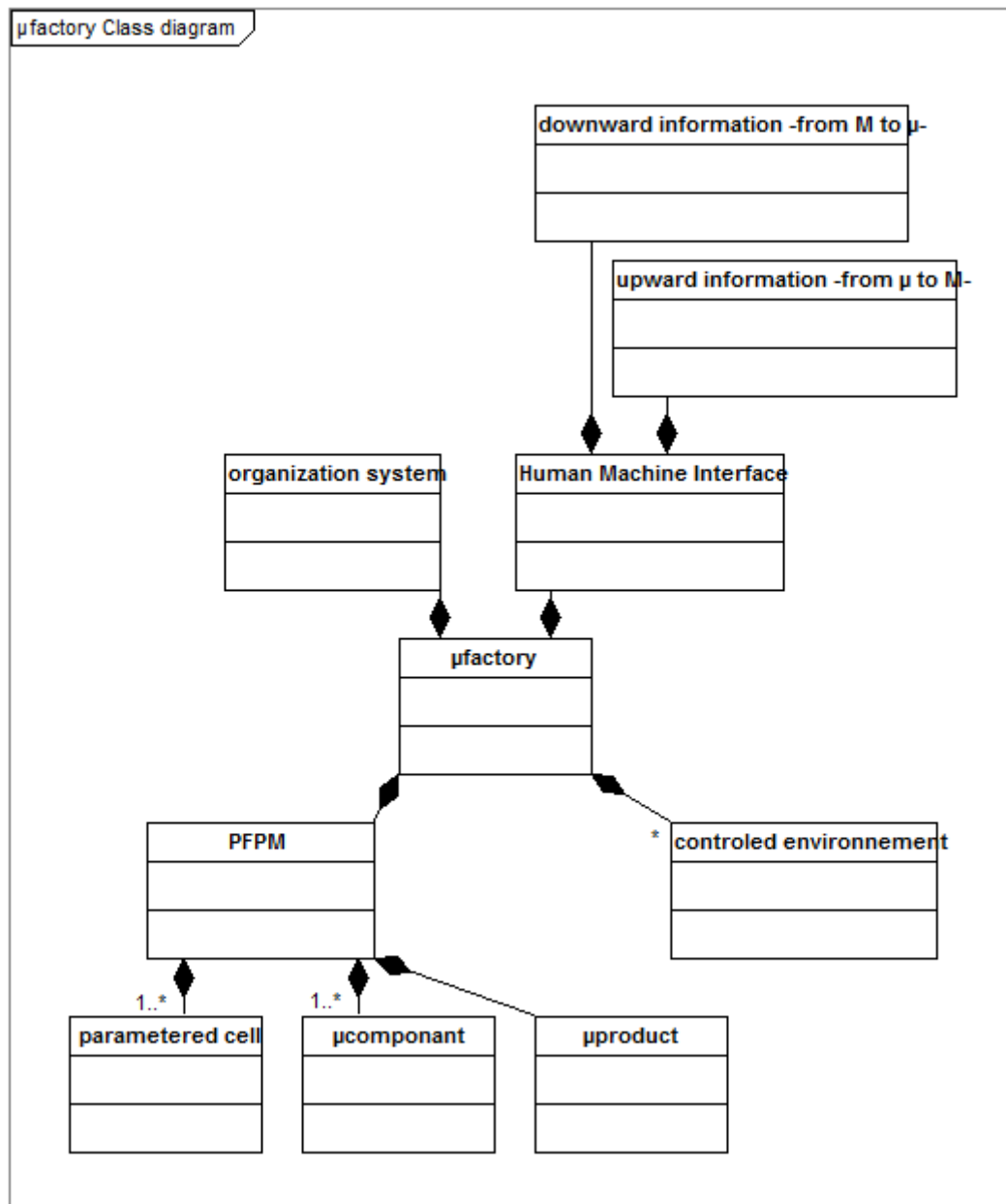
Duplicata Figure 3.14 - Diagramme des classes d'une cellule de micro-usine



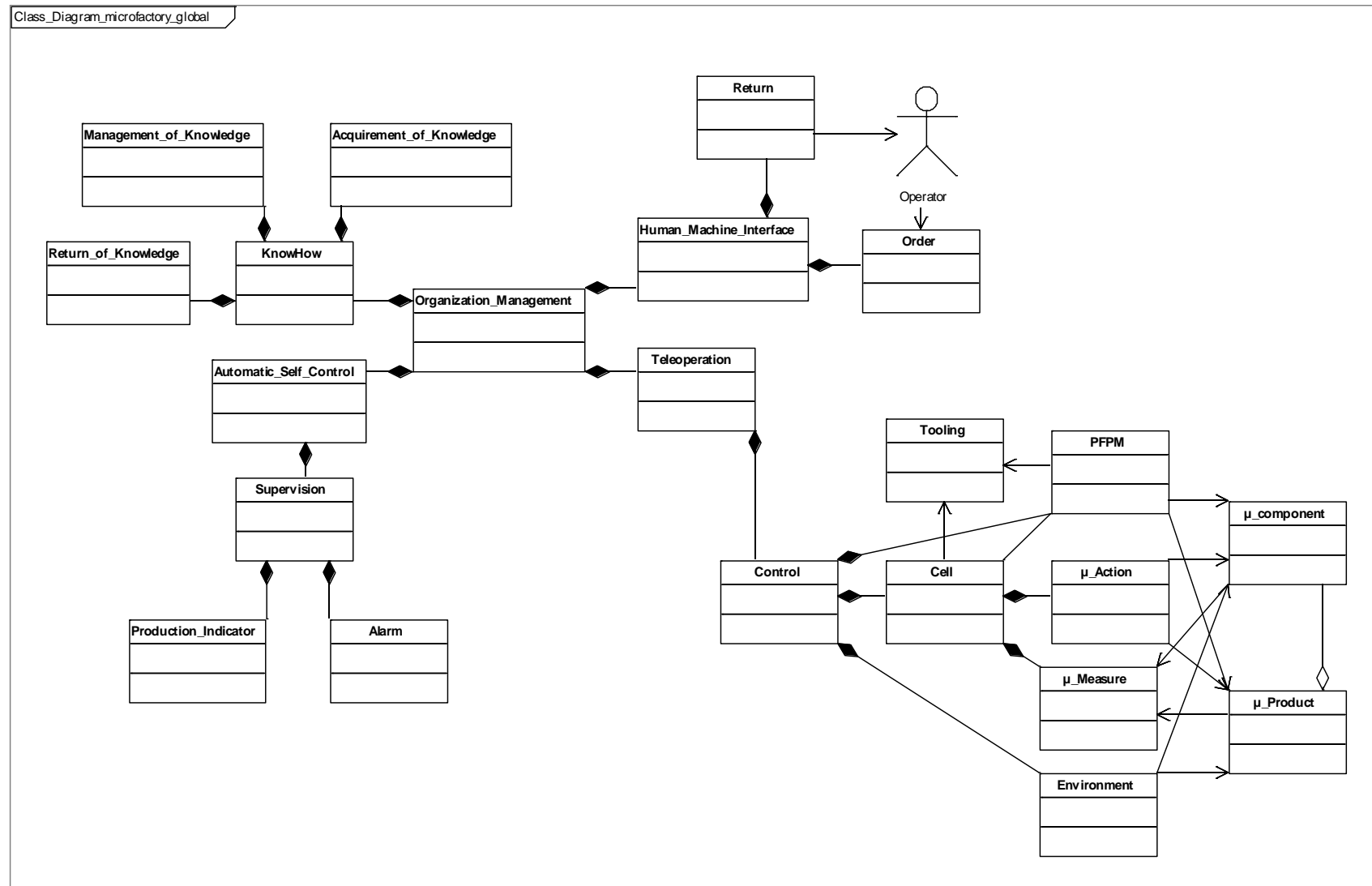
Duplicata Figure 3.18 - Diagramme d'états relatif à la composition d'une structure modulaire de production



Duplicata Figure 3.17 - Diagramme des classes de construction d'une cellule

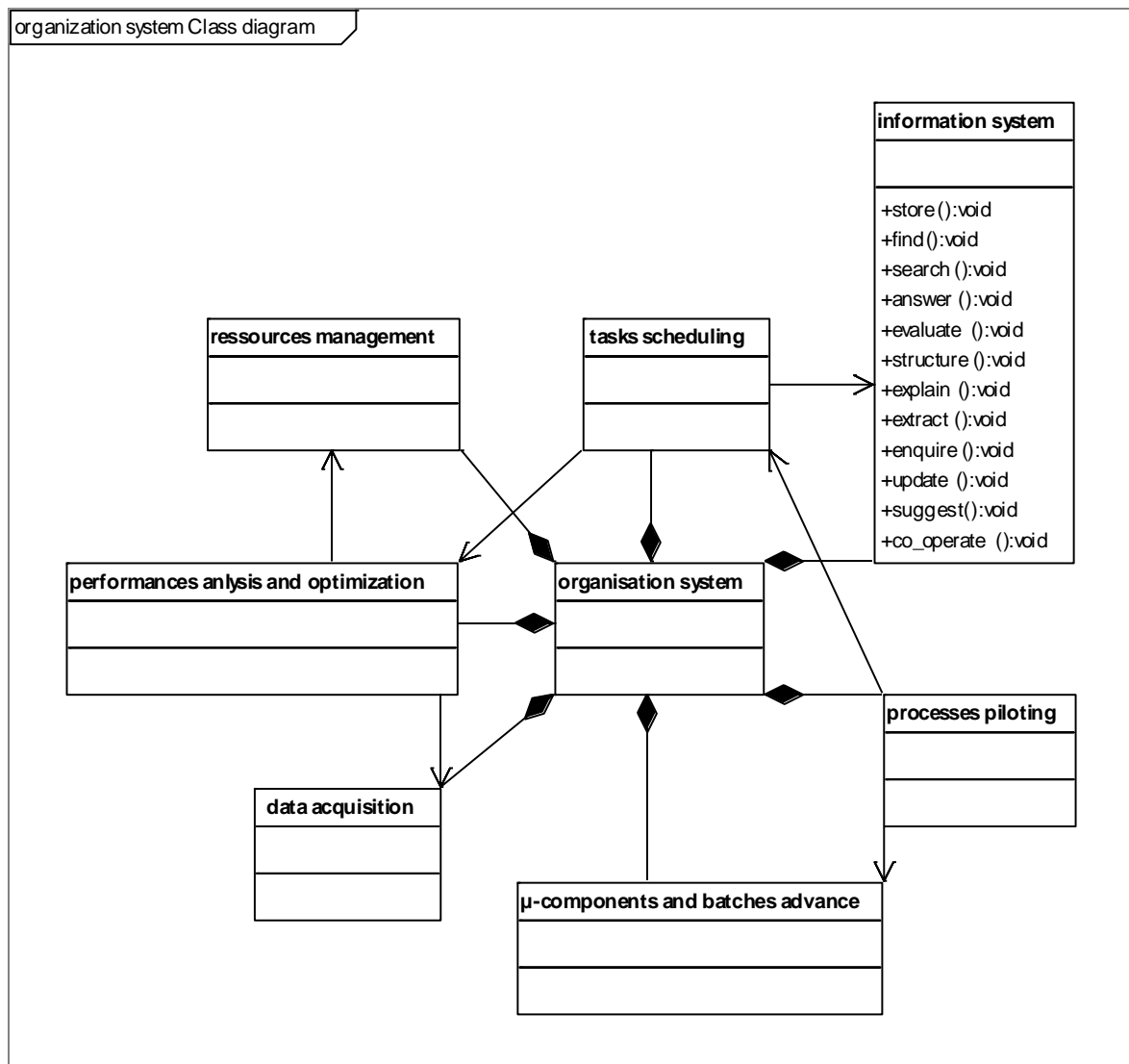


*Duplicata Figure 3.25 - Diagramme global des classes de la micro-usine*



6.9 – Vue générale des classes composant la gestion de l'organisation

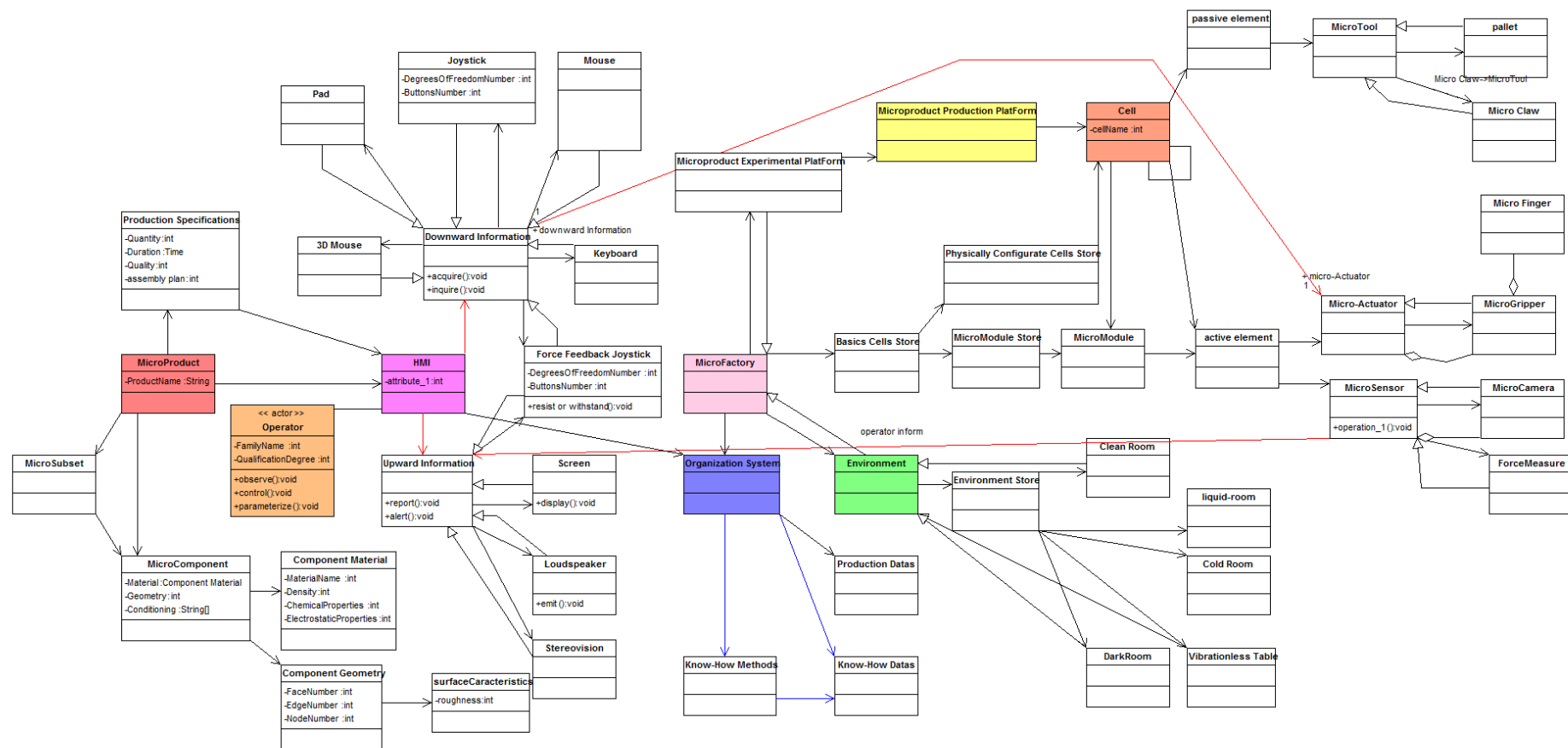




6.10 – Diagramme des classes composant les opérations du système d'organisation

MicroFactory Diagramme de classes

## LAB MicroFactory Class Diagram



6.11 – Vue générale des principales classes de la micro-usine

## 6.4 Annexe 4 : Calcul des coefficients de la loi polynomiale des taux de progression de la connaissance

La courbe en cloche utilisée pour les taux de progression de la connaissance est une fonction polynomiale d'ordre six pour laquelle il s'agit de trouver les sept coefficients. La résolution du système d'équations à sept inconnues, compte-tenu des sept conditions aux limites, a requis l'utilisation d'un logiciel de calcul formel. Pour obtenir des valeurs de coefficients de dimension raisonnable, nous avons ramené la connaissance sur une échelle comprise dans l'intervalle [0 ;1] plutôt que [0 ;100] comme cela est le cas dans le simulateur PACE. Le détail est présenté ci-après

```

In[8]:- y[x_] := a * x^6 + b * x^5 + c * x^4 + d * x^3 + e * x^2;

In[9]:- e1 = y[1] == 0
Out[9]:- a + b + c + d + e == 0

In[10]:- e2 = y'[1] == 0
Out[10]:- 6 a + 5 b + 4 c + 3 d + 2 e == 0

In[11]:- e3 = y[P] == monmax
Out[11]:- e P^2 + d P^3 + c P^4 + b P^5 + a P^6 == monmax

In[12]:- e4 = y'[P] == 0
Out[12]:- 2 e P + 3 d P^2 + 4 c P^3 + 5 b P^4 + 6 a P^5 == 0

In[13]:- e5 = Integrate[y[t], {t, 0, 1}] == 1
Out[13]:-  $\frac{a}{7} + \frac{b}{6} + \frac{c}{5} + \frac{d}{4} + \frac{e}{3} == 1$ 

In[14]:- Factor[Solve[{e1, e2, e3, e4, e5}, {a, b, c, d, e}]]
Out[14]:- { { a →
    ( 7 ( -monmax + 5 monmax P - 5 monmax P^2 - 30 i P^3 + 90 i P^4 -
        90 i P^5 + 30 i P^6 ) ) / ( (-1 + P)^3 P^3 ( 2 - 7 P + 7 P^2 ) ) ,
  b → - ( 6 ( -3 monmax + 13 monmax P - 7 monmax P^2 - 70 i P^3 -
        7 monmax P^3 + 140 i P^4 - 140 i P^6 + 70 i P^7 ) ) /
    ( (-1 + P)^3 P^3 ( 2 - 7 P + 7 P^2 ) ) ,
  c → ( 15 ( -monmax + 3 monmax P + 3 monmax P^2 - 14 i P^3 -
        7 monmax P^3 - 14 i P^4 + 112 i P^5 - 112 i P^6 +
        14 i P^7 + 14 i P^8 ) ) / ( (-1 + P)^3 P^3 ( 2 - 7 P + 7 P^2 ) ) ,
  d → - ( 4 ( -monmax - monmax P + 19 monmax P^2 - 21 monmax P^3 -
        105 i P^4 + 210 i P^5 - 210 i P^7 + 105 i P^8 ) ) /
    ( (-1 + P)^3 P^3 ( 2 - 7 P + 7 P^2 ) ) ,
  e → ( 3 ( -2 monmax + 8 monmax P - 7 monmax P^2 -
        70 i P^4 + 210 i P^5 - 210 i P^6 + 70 i P^7 ) ) /
    ( (-1 + P)^3 P^2 ( 2 - 7 P + 7 P^2 ) ) } }

```

## 7. Bibliographie

L'ensemble des sites Internet mentionnés dans la bibliographie a été vérifié en 2010.

### 7.1 Références bibliographiques

Nos travaux se situent dans la continuité de nombreuses publications scientifiques ainsi que de technologies identifiées par les sites Internet de leur distributeur. Le recensement suivant permet de synthétiser l'ensemble des références bibliographiques mentionnées dans le manuscrit.

- [Agn03] Joël Agnus, "Contribution à la micromanipulation : étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropince piézoélectrique", thèse, 2003
- [Agn09] J. Agnus, D. Hériban , V. Petrini, M. Gauthier, "Silicon End-effectors for microgripping tasks", Precision Engineering, oct.2009
- [Ata02] Tatsuaki Ataka, "The Experimental Microfactory System in Japanese National R&D project", rapport technique, 2002
- [Aud09] Laurent Audibert, "UML 2 : De l'apprentissage à la pratique", 2009, édition Ellipses
- [Aut00] Kellar Autumn, Yiching A. Liang, S. Tonia Hsieh, Wolfgang Zesch, Wai Pang Chan, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing, Robert J. Full, "Adhesive force of a single gecko foot-hair", Nature, vol 405, 8 June 2000
- [Aut02] Kellar Autumn, Metin Sitti, Yiching A. Liang, Anne M. Peattie, Wendy R. Hansen, Simon Sponberg, Thomas W. Kenny, Ronald Fearing, Jacob N. Israelachvili, Robert J. Full, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae", 2002
- [Bay05] Th. Bayer, J. Jenck, M. Matlosz, "IMPULSE – A new approach to process design", Chemical Engineering and Technology, 2005, Vol. 28, p. 431-438
- [Ben00] Léon Benmayor, "Dimensional analysis and similitude in microsystem design and assembly", Thèse EPFL, 2000
- [Ben07] M. Bengel, "Modelling objects for skill-based reconfigurable machines", Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems IPROMS, 2007
- [BerA97] Alain Berthoz " le sens du mouvement " chez Odile Jacob, 1997
- [BerJ06a] J. Bert, S. Dembélé and N. Lefort-Piat, "Virtual Camera Synthesis for Micromanipulation and Microassembly", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'06, Oct. 2006
- [BerJ06b] J. Bert, S. Dembélé and N. Lefort-Piat, "Toward the Vision Based Supervision of Microfactories Through Images Mosaicing", International Precision Assembly Seminar (IPAS), 2006
- [BerJ06c] J. Bert, S. Dembélé and N. Lefort-Piat, "Trifocal Transfer Based Novel View Synthesis for Micromanipulation", Proc. on the Int. Symposium on Visual Computing (ISVC), Lecture Notes in Computer Science, Lake Tahoe, USA, Nov. 2006
- [BerJ06d] J. Bert, S. Dembélé and N. Lefort-Piat, "Synthesizing a Virtual Imager with a Large Field of View and a High Resolution for Micromanipulation", Proc. on the Int. Workshop on Microfactories, Besançon, France, Oct. 2006
- [BerJ07] J. Bert, S. Dembélé and N. Lefort-Piat "Performing weak calibration at the microscale, application to micromanipulation", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2007), Roma, Italy, April 2007
- [Big06] Michel Bigand, Jean-Pierre Bourey, Hervé Camus, Didier Corbeel, "Conception des systèmes d'information, modélisation des données", Technip, Paris, 2006 (ISBN 2-7108-0874-9)
- [Bis04] Giuliano Bissacco, PhD "Surface generation and optimization in micromilling", Technical University of Denmark, oct 2004
- [Bre98] Jean-Marc Breguet, « Actionneurs 'Stick and Slip' pour micro-manipulateurs », thèse EPFL, 1998

- [Cha07] A. Chau, S. Régnier, and P. Lambert, "Influence of geometrical parameters on capillary forces", Proc. of ISAM'07: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, SA, July 2007
- [Che09] Ali Cherry, "Etude, conception et optimisation d'une plateforme de mesure de micro et nano force par flottaison magnétique", thèse Femto-st AS2M, 2009
- [Cib] <http://www.cibel.com/>
- [Cir] <http://www.cire.fr/>
- [Cla91] Reymond Clavel, "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté", Thèse EPFL, 1991
- [Clé05] Cédric Clévy, "Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage", thèse, 2005
- [Cod02] A. Codourey, M. Honegger, "A centralized control system for microfactories", Third International Workshop on Micro-Factories, Minneapolis, Minnesota, September 16-18, 2002
- [Com05] J.M. Commenge, L. Falk, J.P. Corriou, M. Matlosz, "Analysis of microstructured reactor characteristics for process miniaturization and intensification", Chemical Engineering and Technology, 2005, Vol. 28, p. 446-458
- [Cor02] Carlos del Corral, Pedro J. Esteban, Aurelian Albut, Quan Zhou and Heikki N. Koivo, "Influence of Environment Conditions on Microassembly Components and Pick-and-Place Operations", ICMA, 2002
- [Daf08] Mélanie Dafflon, "Préhenseurs, conditions et stratégies pour une micromanipulation de précision", Thèse EPFL, 2008
- [Dia07] Sékou Diakité, Jean-Marc Nicod, and Laurent Philippe. Adaptation d'un algorithme optimal d'ordonnancement en régime permanent pour des lots bornés. Research Report RR2007-03, LIFC - Laboratoire d'Informatique de l'Université de Franche Comté, December 2007
- [Dia08a] Sékou Diakité, Jean-Marc Nicod, and Laurent Philippe. Processing Identical Workflows on SOA Grids: Comparison of Three Approaches. In DFMA'08, 4th IEEE Int. Conf. on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, Penang, Malaysia, pages 27-34, October 2008
- [Dia08b] Sékou Diakité, Jean-Marc Nicod, and Laurent Philippe. Comparison of Batch Scheduling for Identical Multi-Tasks Jobs on Heterogeneous Platforms. In PDP 2008, 16th Euromicro Int. Conf. on Parallel, Distributed and network-based Processing, Toulouse, France, 374-378, 2008
- [Dia08c] Sékou Diakité, Jean-Marc Nicod, and Laurent Philippe. Adaptation d'un algorithme optimal d'ordonnancement en régime permanent pour des lots bornés. In RenPar'18, 18èmes Rencontres francophones du Parallélisme, Fribourg, Switzerland, 2008
- [Dia09] Sékou Diakité, Loris Marchal, Jean-Marc Nicod, and Laurent Philippe. Steady-State for Batches of Identical Task Graphs. In Euro-Par'09, volume 5704 of LNCS, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, pages 203--215, August 2009
- [Des04] Eric Descourvières, Dominique Gendreau, Philippe Lutz, François Kiefer, "Specifications of technical information system dedicated to a reorganizable and reconfigurable microfactory", IWMF, 2004
- [Des07] Eric Descourvières, Stéphane Debricon, Dominique Gendreau, Philippe Lutz, Laurent Philippe, Fabrice Bouquet, "Towards automatic control for microfactories", AIAI, 2007
- [DTF] <http://www.dtf.ne.jp/en/>
- [Eri09] Emma Eriksson, "Towards quantitative single cell analysis using optical tweezers and microfluidics", Thesis, Department of Physics UNIVERSITY OF GOTHENBURG, Gothenburg, Sweden, 2009
- [Eth05] « Ethernet temps réel », Journée d'information de l'institut d'Automatisation industrielle de l'Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud (EIVD), 1er juin 2005, Yverdon-les-Bains, Suisse
- [Eyn04] B. Eynard, T. Gallet, P. Nowak, L. Roucoules "UML based Specifications of PDM Product Structure and Workflow", Computers in industry, 2004, vol.55, n° 3, p. 301-316
- [Fat00] Sergej Fatikow, "Mikroroboter und Mikromontage, Aufbau, Steuerung und Planung von flexiblen, mikroroboterbasierten Montagestationen", livre, 2000
- [Fro03] Peter Fromherz, "Neuroelectronic Interfacing : Semiconductor Chips with Ion Channels, Nerve Cells, and Brain", "Nanoelectronics and Information Technology" editor Rainer Waser, Wiley-VCH (Berlin), 2003, (Max-Planck-Institute for Biochemistry - Département membrane et neurophysique : <http://www.biochem.mpg.de/mnphys/> )

- [GauM06a] M. Gauthier, D. Hériban, D. Gendreau, S. Régnier, N. Chaillet, "Micro-factory for submerged assembly: Interests and Architectures", 5th International Workshop on Microfactories, IWFM'06, Besancon, France, October 25-27, 2006
- [GauM07c] M. Gauthier, S. Régnier, B. Lopez-Walle, E. Gibeau, P. Rougeot, D. Hériban, N. Chaillet, "PRONOMIA project: Micro-assembly and modeling of the microworld", Workshop on Micro-assembly of 3D Hybrid MEMS, Int. Conf on Intelligent Robotics and Systems, San Diego, oct. 2007
- [GauJY07] Jean-Yves Gauthier, "Modélisation des Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques pour la conversion d'énergie dans les actionneurs et leur commande.", thèse, 39417
- [GauT01] Tobias Gaugel, Hannes Dobler, "Advanced Modular Micro-Production System (AMMS)", article Microrobotics and Microassembly III, 2001
- [GauT03] Tobias Gaugel, Matthias Bengel, Dirk Malthan, "Building a mini-assembly system from a technology construction kit", IPAS, 2003
- [GauT04] T. Gaugel, M. Bengel, D. Malthan, J. Schliesser, J. Kegeler, G. Munz, "Miniaturized reconfigurable micro-assembly system", Microfactory for Precision Assembly Applications, International Precision Assembly Seminar, Bad Hofgastein, Austria, February 11-13, 2004
- [Gen10] D. Gendreau, M. Gauthier, D. Hériban, P. Lutz, "Modular architecture of the microfactories for automatic micro-assembly", Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 26, 4 (2010) 354-360"
- [Glo07] P Glocker, R Wyss, P Schmid, U Zbinden, J Taprogge, M Honegger, A Steinecker, G Gruener, C Meyer, "Microfactory - A flexible assembly platform", Scientific and Technical Report, 2007
- [Gre05] A. Michael Greminger, A. Serdar Sezen, Bradley J. Nelson, "A Four Degree of Freedom MEMS Microgripper with Novel Bi-Directional Thermal Actuators", IROS 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005
- [Gro09] Mathieu Grossard, Nicolas Chaillet, Mehdi Boukallel, Arnaud Hubert and Christine Rotinat-Libersa, "Towards the mechanical and control-oriented optimization of micromechatronic systems for robust control", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [Guy09] Laurent Guyout, Guillaume Fromentin, Philippe Picart, "Effets d'échelle en Micro Fraisage d'un acier inoxydable 316L", CFM2009 communication n° 1283
- [Has03] Raïd Hasan, Patrick Martin, "Contribution à la conception d'une nouvelle génération des systèmes de fabrication : les Systèmes Manufacturiers Reconfigurables (SMR) ", article, 2003
- [Hér07] D. Hériban, E. Descourvières, B. Ballarin, D. Gendreau, P. Lutz, "Architecture modulaire pour le pilotage des microsystèmes de production. Application à la micromanipulation télé-opérée", 5e Conférence internationale L'automatisation industrielle, ETS, Montréal, Québec, Canada, 11-13 june 2007
- [Hér08c] D. Hériban, M. Gauthier, D. Gendreau, "Modular Robotic Platform for Silicon Micromechanical Components Assembly", proc. of the 6th int. Workshop on Microfactories, Evanston, Illinois, USA, October 2008
- [Hér] <http://www.percipio-robotics.com/>
- [Hol06] R. L. Hollis, D. O'Halloran, G. Fedder, N. Sarkar, J. (Red) Jones, "Vision Guided Pick and Place in a Minifactory Environment", IWFM, 2006
- [Int] <http://www.intel.com/go/lightpeak>
- [Jac02] Bruno Jacomy « l'âge du Plip », 2002
- [JohLee] <http://www.johnnylee.net/projects/wii/>
- [Jun02] David Juncker "capillary microfluidic systems for bio/chemistry", PhD, Neuchâtel-Zurich 2002
- [Kit98] T. Kitahara, K. Ashida, Y. Ishikawa, T. Kitahara, N. Ooyama et T. Ataka, " Microfactory and microlathe", Proc. International Workshop on Microfactories, 1998
- [Kor99] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritchard, H. Van Brussel, A.G. Ulsoy, "Reconfigurable Manufacturing Systems", CIRP Annals (keynote paper), 1999
- [LamS03] Safia Lamrani, Raïd Hasan, Patrick Martin, "Processus de conception des Systèmes Manufacturiers Reconfigurables (SMR) : Approche à l'aide des Réseaux de Pétri (RdP)", article, 2003

- [LamP03] Pierre Lambert, Pierre Letier, Alain Delchambre, "Capillary and surface tension forces in the manipulation of small parts", IEEE isatp, 2003
- [LamP10] Pierre Lambert, "Surface tension effects in microrobotics", HDR, université de Franche-Comté, 7 sept 2010
- [Len08] Cyrille Lenders, Jean-Baptiste Valsamis, Maxime Desaedeleer, Alain Delchambre, Pascal Lambert, "Assembly of a Micro Ball-Bearing using a Capillary Gripper and a Microcomponent Feeder". IPAS 2008: p. 265-274
- [Len09] Cyrille Lenders, Michaël Gauthier, Pierre Lambert, "Microbubble generation using a syringe pump". IROS 2009: 1395-1400
- [LoW08] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, N. Chaillet, "Principle of a Submerged Freeze Gripper for Micro-assembly", IEEE Trans. on Robotics, 39753
- [Meh00] M.G. Mehrabi, A.G. Ulsoy, Y. Koren, "Reconfigurable Manufacturing System and Their Enabling Technologies", International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2000
- [Nan] <http://www.nanotechnik.com/>
- [Oga98] Haruo Ogawa, "Micro-assembly system.", Olympus Optical CO, LTD, Japan, 1998
- [Oka02] Yuichi Okazaki, Nozomu Mishima, Kiwamu Ashida, "Microfactory and Micro Machine Tools", The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, Korea, 2002
- [Oly99] Olympus, "http://www.olympus-global.com/en/news/1999b/nr991201mifae.cfm", 1999
- [OMG] <http://www.omg.org/spec/UML/2.3/>
- [Pac09] C. Pacoret, R. Bowman, G. Gibson, S. Haliyo, D. Carberry, A. Bergander, S. Régnier, Padgett M., "Touching the microworld with force-feedback optical tweezers.", OPTICS EXPRESS, 2009
- [pace] <http://www.ibepace.com/>
- [Par08] Mikael Paris, "Conception et commande de systèmes d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision", Thèse, 2008
- [Par] <http://www.parlex.com/>
- [Pet73] Petri, C.A., "Concepts of net theory", Proc. Symp. and Summer School on Mathematical Foundations of Computer Science, High Tatras, Math. Inst. Slovak Academy of Science, Sept. 3-8, 1973
- [Pet82] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material", IEEE Proceedings, may 1982
- [PI] <http://www.physikinstrumente.com/>
- [Pil06] Pilone D., "UML 2.0: Pocket Reference", 2006
- [Poc] <http://www.haptique.com/>
- [Poc04] Aurélien Pocheville, Abderrahmane Kheddar "I-Touch: a framework for computer haptics ", IROS 2004
- [Poc06] Aurélien Pocheville, Johann Citérin, Abderrahmane Kheddar "A touch rendering device in a virtual environment with kinesthetic and thermal feedback", ICRA 2006
- [Pop09] D.O. Popa, N. Aditya Das, "Precision-Driven Hybrid Control for 3D Microassembly", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [pos] Logiciel Poseidon chez <http://www.gentleware.com/>
- [Pro05] [http://www.lab.cnrs.fr/pronomia/accueil\\_vf.php](http://www.lab.cnrs.fr/pronomia/accueil_vf.php)
- [Rak06] Micky Rakotondrabe, "Développement et commande modulaire d'une station de microassemblage", PhD of the University of Franche-Comte, Besancon, France, 2006



- [Rou04] L. Roucoules, A. Skander, B. Eynard, "XML-based knowledge management for DFM", International Journal of Agile Manufacturing, vol. 7, n° 1, p. 71-76, 2004
- [Sak07] Kelly Sakaki, Nikolai Dechev, Edward J. Park, Robert D. Burke, "Development of a Five Degree-of-Freedom Biomanipulator for Autonomous Single Cell Electroporation", Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007
- [San] <http://www.mems.sandia.gov/>
- [San08] D. Santos, B. Heyneman, S. Kim, N. Esparza, M.R. Cutkosky, "Gecko-Inspired Climbing Behaviors on Vertical and Overhanging Surfaces", proceedings: IEEE ICRA 2008, Pasadena, May 19-23, 2008
- [Sil] <http://www.silmach.com/>
- [Sma] <http://www.smaract.de/>
- [Sun05] Lining Sun, Hui Xie, Weiben Rong et Liguio Chen, "Task-reconfigurable system for MEMS assembly.", Proceedings of the 2005 IEEE ICRA, International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005
- [Tam08a] Brahim Tamadazte, Soukalo Dembélé and Nadine Le Fort-Piat, "A Multiscale Calibration of a Photon Video Microscope for Visual Servo Control : Application to Micromanipulation", IEEE ROSE, 2008
- [Tam08b] Brahim Tamadazte, Soukalo Dembélé, Guillaume Fortier and Nadine Le Fort-Piat, "Automatic Micromanipulation using Multiscale Visual Servoing", CASE, 2008
- [Tam09b] Brahim Tamadazte, Thomas Arnould, Soukalo Dembélé, Nadine Le Fort-Piat, Eric Marchand, "Real-time Vision-Based Microassembly of 3D MEMS", IEEE-AIM2009
- [Tam09c] Brahim Tamadazte, Nadine Le Fort-Piat, Soukalo Dembélé, Guillaume Fortier, "Robotic micromanipulation for microassembly : modelling by sequential function chart and achievement by multiple scale visual servoings", J.Micro-NanoTech.2009
- [Tan01] Makoto Tanaka, "Development of desktop machining microfactory", Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Techniques, April, 2001
- [Ver06] Irène Verettas, "microfabrique : méthodologie de conception de systèmes de production miniaturisés et modulaires, disposant d'un environnement salles blanches", PhD, EPFL, 2006
- [Why06] Graeme Whyte, Graham Gibson, Jonathan Leach, Miles Padgett., "An optical trapped microhand for manipulating micron-sized objects", Opt. Express 14, 2006
- [Xie05] Hui Xie, Liguio Chen, Lining Sun, Weiben Rong, "Hybrid Vision-Force Control for Automatic Assembly of Miniaturized Gear System", Proceedings of the 2005 IEEE ICRA, International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005
- [Zho01] Quan Zhou, Albut Aurelian, Carlos del Corral, Pedro J. Esteban, Pasi Kallio, Bo Chang, Heikki N. Koivo, "A Microassembly Station with Controlled Environment", SPIE, 2001

## 7.2 Bibliographie générale

Plus généralement, une large bibliographie a été consultée durant la période de doctorat. Elle a nécessairement influencée nos travaux et notre rédaction, donc nous mentionnons ici leurs références.

- [Ash00] K. Ashida, N. Mishima and al., "Development of desktop machining microfactory", Japan-USA Flexible Automation Conference, Ann Arbor, Michigan, July 23-26, 2000
- [BerP05] P. Berruet, J.-L. Lallican, A. Rossi, J.-L. Philippe, "A component based approach for the design of FMS control and supervision", IEEE SMC, the Big Island, Hawaii, USA, October 10-12, 2005
- [Das06] A. Dashchenko, I. Anatoli, "Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories", 1st Edition, Springer Verlag, Heidelberg, 2006
- [Des06] Eric Descourvières, Dominique Gendreau, Philippe Lutz, "Data representation for the control of full-automated microfactories", Proc. (CD ROM) of the 5th International Workshop on Microfactories, IWMF'06, Besancon, France, October 25-27, 2006



- [Fan06] J. Fang, F. Wang, K.F. Böhringer, "Self-Assembly of PZT Actuators for Micropumps with High Process Repeatability", *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, August 2006
- [Fen03] Shaw C. Feng, Yong-Gu Lee, Kenvin W. Lyons, "An Open Framework for the Assembly of Micro- and Nano-Scale Artifacts", *IEEE isatp*, 2003
- [Gar03] S. Garbaya, Ph. Coiffet, P. Blazevic, "Experiments of Assembly Planning in Virtual Environment", *IEEE isatp*, 2003
- [GauM05] M. Gauthier, B. Lopez-Walle and C. Clevy, "Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums", *proc. of CIRA'05*, Espoo, Finland, 2005
- [GauM06b] M. Gauthier, E. Gibeau and D. Heriban, "Submerged Robotic Micromanipulation and Dielectrophoretic Micro-object Release", *proc. of the IEEE-ICARCV'06*, Dec. 2006
- [GauM06c] M. Gauthier, S. Régnier, P. Rougeot, N. Chaillat, "Analysis of forces for micromanipulations in dry and liquid media", *Journal of Micromechatronics*, 2006
- [GauM06d] M. Gauthier, S. Régnier, P. Rougeot, N. Chaillat, "Forces analysis for micromanipulation in dry and liquid medium", *Journal of Micromechatronics*, 2006
- [GauM07a] M. Gauthier, M. Nourine, "Capillary Force Disturbances in Submerged Robotic Micromanipulations", *IEEE Trans. on Robotics*, June 2007
- [GauM07b] M. Gauthier, S. Régnier, "La manipulation aux échelles microscopiques", *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Obernai, oct.2007
- [GenU02] U. Gengenbach, F. Engelhardt, A. Hofmann, R. Scharnowell, H. Skupin, M. Bär, "A modular and flexible assembly system for micro fluidic analysis systems", *article IWMF*, 2002
- [Gen07] D. Gendreau, M. Gauthier, D. Hériban, P. Lutz, "Contribution à la mise en place d'une architecture modulaire pour la conception des microsystèmes de production", *7e Congrès international de génie industriel*, Trois-Rivières, Québec, Canada, 5-8 june 2007
- [Goe03] Virginie Goepp, "Contribution à la conception d'une Architecture d'information ", *thèse*, 2003
- [Gor09] Jason J. Gorman, Thomas W. Lebrun, Arvind Balijepalli, "Controlled Optical Trapping of Nanoparticles", *ICRA2009*, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [Gou07] D. Gouyon, J.-F. Pétin, G. Morel, "A Product-Driven Reconfigurable Control for Shop Floor Systems", *Studies in Informatics and Control, With Emphasis on Useful Applications of Advanced Technology*, 2007
- [Had00] Haddab Yassine, "conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objet de taille microscopique", *thèse*, 2000
- [Har79] D. Harel, "First-Order Dynamic Logic", *Lecture Notes in Computer Science*, 1979
- [Hei07] R.H. Heikkil, I.T. Karjalainen, J.J. Uusitalo, A.S. Vuola, R.O. Tuokko, "Possibilities of a Microfactory in the Assembly of Small Parts and Products. First Results of the M4-project", *Assembly and Manufacturing, ISAM apos;07. IEEE International Symposium on Volume Issue*, July 22-25, 2007
- [Hen03] Jean-Michel Henrioud, Laurent Relange, Christophe Perrard, "Assembly sequences, assembly constraints, precedence graphs", *IEEE isatp*, 2003
- [Hér06] D. Hériban, J. Agnus and M. Gauthier, "Micromanipulation of silicate micro-sized particles for biological applications", *Proc. on the Int. Workshop on Microfactories*, Oct. 2006
- [Hér08a] D. Hériban, A. Thiebault, M. Gauthier, G. Fortier, "Improving Rotation Behaviour of Robotic Structures for Micro-Assembly", *proceedings of the 2008 IEEE/CASE*, Washington DC, USA, août 2008
- [Hér08b] D. Hériban, M. Gauthier, "Robotic Micro-assembly of Two Microparts", *proc. of the IEEE/RSJ IROS Conference*, Nice, France, septembre 2008
- [Hir04] H. Hirani, S. Ratchev, N. Lohse, G. Valtchanov, "Web-based specification of reconfigurable precision assembly systems – industrial scenarios and use cases", *Microfactory for Precision Assembly Applications, International Precision Assembly Seminar*, February 11-13, 2004
- [Hon..] M.-O. Hongler, J. Jacot, Ph. Ney, F. Arrieta, O. Ryser, Ch. Gertsch, J.-L. Lopez, F. Marques, M. Frauenfelder, F. Walter, "Highly flexible feeding of components for automatic assembly. The SyFA module"
- [IEC02] International Electrotechnical Commission, "GRAFCET specification language for sequential function charts", *International Standard, IEC 60848*, February 2002
- [Jas09] Daniel Jasper, "Force control for nanohandling inside Scanning Electron Microscopes", *ICRA2009*, Kobe, Japan, 12-17 May 2009

- [Koc02] Oliver Koch, Wolfgang Ehrfeld, "Development and fabrication of a modular microreaction system", article IWMF, 2002
- [Koe..] Sandra Koelemeijet-Chollet, F. Bourgeois, C. Wulliens, J. Jacot, "Cost modelling of microassembly", ,
- [Koe02] Sandra Koelemeijet-Chollet, F. Bourgeois, L. Benmayor, B. Moll, C. Wulliens, J. Jacot, "a flexible microassembly cell for small and medium sized batches", ISR, 2002
- [Koe03] Sandra Koelemeijet-Chollet, F. Bourgeois, J. Jacot, "Economical Justification of Flexible Microassembly Cells", IEEE isatp, 2003
- [Kur99] T. Kurita, S. Watanabe, M. Hattori, "Development of hybrid micro machine tool.", Proc. Second International Symposium on Environment Conscious Design and Inverse Manufacturing, 1999
- [Les94] Jean-Jacques Lesage, "Contribution à la formalisation des modèles et méthodes de conception des systèmes de production ", HDR, 1994
- [Lig04] Chen Ligu, Sun Lining, Rong Weibin, Bian Xinqian, "Hybrid Control of Vision and Force for MEMS Assembly System", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China, August 22 - 26, 2004
- [Lin00] Ryan J Linderman, Victor M Bright, "Optimized Scratch Drive Actuator for tethered nanometer positioning of chip-sized components", Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 2000
- [Loh04] N. Lohse, S. Ratchev, A. Chrisp, "Function-behaviour-structure model for modular assembly equipment", Micro-factory for Precision Assembly Applications, International Precision Assembly Seminar, February 11-13, 2004
- [LoW06a] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, N. Chaillet, "Submerged Freeze Gripper to Manipulate Micro-objects", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'06, Oct. 2006
- [LoW06b] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, N. Chaillet, "Principle of a submerged freeze microgripper", Proc. on the Int. Workshop on Microfactories, Oct. 2006
- [LoW07a] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, N. Chaillet, "A Submerged Freeze Microgripper for Micromanipulations", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2007), Roma, Italy, April 2007
- [LoW07b] B. Lopez Walle, M. Gauthier, N. Chaillet, "Dynamic modelling of a submerged freeze microgripper using a thermal network", proceedings of the 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, sept. 2007
- [Mab96] M. Mabrouk, "Proposition d'une méthode et d'un outil d'aide à la reconfiguration des systèmes automatisés de production", thèse, 1996
- [Mac09] Robert A. Maclachlan, Brian C. Becker, Cameron N. Riviere, "Control of an Active Handheld Instrument for Microsurgery and Micromanipulation", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [Mar87] D.A. Marca, C.L. McGowan, "SADT: structured analysis and design technique", 1987
- [Mat94] Jean-Patrick Matheron, "Comprendre MERISE outils conceptuels et organisationnels", livre, Eyrolles, 1994
- [Mat09] Leonardo S. Mattos, Darwin G. Caldwell "Fast and Precise Micropipette Positioning System based on Continuous Camera-Robot Recalibration and Visual Servoing", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [MGr04] Craig McGray, "Effect of insulator thickness and dielectric constant on SDA performance", 2004
- [Mog03] Xavier Moghrabi, Paul Gaborit, "L'approche Model-Driven Architecture, crédible pour développer un progiciel de gestion intégré", mémoire de DEA - systèmes industriels, 2003
- [Mor03] Chantal Morley, Jean Hugues, Bernard Leblanc, "UML pour l'analyse d'un système d'information, le cahier des charges du maître d'ouvrage", livre Dunod, 2003
- [MouN06] N. Mourad, M. Gauthier, "Effect of the Capillary Force on Force Measurements in Submerged Micromanipulations", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'06, Oct. 2006
- [MouE06] E. Mounier, Y. De Charentenay, J.-C. Eloy, "New applications for MOEMS", Proceedings of SPIE, MOEMS display, imaging, and miniaturized microsystems IV, San Jose, California, USA, January 25-26, 2006
- [Nel01] B.J. Nelson, J.-M. Breguet, "Microrobotic and Micro-assembly III", Proceedings of SPIE, 2001
- [Ngu07] Minh-Quang Nguyen, Philip H.P. Nguyen, Tho-Hau Nguyen, Jean-Guy Meunier, Douglas O'Shaughnessy, "Apprentissage par renforcement à l'aide d'un utilisateur simulé pour optimiser automatiquement les stratégies de dialogue", AIAI, 2007

- [Opi69] H. Opitz, W. König, "On the wear of cutting tools", 8th M.T.D.R. Conference, Montreal, 1969
- [Pan06] Seno Panjaitan, Georg Frey, "Designing Generic/Reusable Functionality Based Controller for Distributed Control using UML", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May 15-19, 2006
- [Per05] Sébastien Perroud, Alain Codourey, Y. Mussard, "PocketDelta : a miniature robot for Microassembly", Scientific and Technical Report, 2005
- [Per06] S. Perroud, M. Honegger, K Krasnopolski, S. Bitterli, M. Gasser, "New pocket and desktop delto robots ith integrated controllers", Scientific and Technical Report, 2006
- [Pho03] Chris Phoenix, "Design of a Primitive Nanofactory", Journal of Evolution and Technology, October 2003
- [Pop02] Dan O. Popa, Byoung Hun Kang, Jeongsik Sin, Jie Zou, "Reconfigurable micro-assembly system for photonics applications", ICRA, 2002
- [Pop04] D.O. Popa, H.E. Stephanou, "Micro and mesoscale robotic assembly", Journal of manufacturing processes, 2004
- [Rak04] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab, Philippe Lutz, "Modelling and control of a highly modular microassembly system", IWMF, 2004
- [Rak05] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab, Philippe Lutz, "Step Modelling of a High Precision 2DoF (Linear-Angular) microsystem", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelone, Spain, April 18-22, 2005
- [Rak09] Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz, "Main aspects of the control issues in the micro/nano-world", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [Rit06] T. Ritala, P. Kallio, S. Kuikka, "Real-time motion control software for a micromanipulator", IFAC, 2006
- [Roc89] Arnold Rochfeld, José Moréjon, "La Méthode Merise, tome 3 Gamme opératoire", livre, les éditions d'organisation, 1989
- [Rog97] G.G. Rogers, L. Bottaci, "Modular Production Systems: A New Manufacturing Paradigm", International Journal of Intelligent Manufacturing, April 1997
- [Rus93] R.A. Russell, "Development of a robotic manipulator for micro-assembly operations", Intelligent Robots and Systems (IROS)93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference, July 26-30, 1993
- [She03] Yantao Shen, Ning Xi, Wen Jung Li, "Contact and force control in microassembly", IEEE isatp, 2003
- [Spr06] B Sprenger, T Bruch, "PreciAmp - High precision servo-amplifier for brushless DC-motors (application in the microdelta robot)", Scientific and Technical Report, 2006
- [Ste07] A Steinecker, "Nanohand - A system for automated nano-handling - An integrated EU Project", Scientific and Technical Report, 2007
- [Stö06] T Stöckli, J Auerswald, P Schmid, S Perroud, A Steinecker, A Codourey, H F Knapp, "high precision robotics for automated cell handling", Scientific and Technical Report, 2006
- [Sud00] Masayuki Suda, Kazuyoshi Furata, Tochihiro Sakuhara, Tatsuaki Akata, "The microfactory system using electrochemical machining", Galvanotechnik journal, Japan, 2000
- [Tam08] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, Guillaume Fortier, Nadine Le Fort-Piat, "Automatic micromanipulation using multiscale visual servoing", 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, CASE'08., Washington DC : États-Unis d'Amérique , 2008
- [Tam09a] Brahim Tamadazte, Nadine Le Fort-Piat, Sounkalo Dembélé, Eric Marchand, "Microassembly of Complex and Solid 3D MEMS by 3D Vision-based Control", IROS, 2009
- [Tar86] Hubert Tardieu, Arnold Rochfeld, René Colletti, "La Méthode Merise, tome 1 Principes et outils", livre, les éditions d'organisation ,1986
- [Tar05] Viatcheslav Slava Tararykine, "Modélisation des flux d'information dans un système de e-maintenance", thèse LAB, 2005
- [Tog07] Toguyeni A., Dangoumau N., Lee E.J., "A Synthesis Approach for Reconfigurable Manufacturing Systems Design Based on Petri Nets", Studies in Informatics and Control, With Emphasis on Useful Applications of Advanced Technology, 2007
- [Tre02] Damien Trentesaux, "Pilotage hétérarchique des systèmes de production ", HDR, 2002
- [Van07] Romain Vandenberght, "Etude d'un asservissement purement mécanique pour application dans les MEMS", master, 2007

- 
- [Ver05a] Irène Verettas, Raymond Clavel, Alain Codourey, "Micro Factory : Concept d'un chaîne d'assemblage miniature, modulaire et propre", SSC (Société Suisse de Chronométrie, journée d'étude à Bienne), 2005
- [Ver05b] Irène Verettas, Raymond Clavel, Alain Codourey, "Pocket-factory : Methodology for the conceptin of desktop clean room for the production of microsystems", Scientific and Technical Report, 2005
- [Vit07] J. Vitard, S. Régnier, P. Lambert, "Study of cylinder/plan capillary force near millimeter scale and experimental validation", Proc. of ISAM'07 : IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, USA, July 2007
- [Was09] John Wason, John Wen, "Robust Vision-Guided Multi-probe Microassembly", ICRA2009, Kobe, Japan, 12-17 May 2009
- [Wys06] R Wyss, M Gasser, M Honegger, S Perroud, G Gruener, "Robot workspace surveillanc and human interaction with a 3D-vision system", Scientific and Technical Report, 2006
- [Xie07] H. Xie, J. Vitard, S. Haliyo, and S. Régnier. , "Enhanced Sensivity of Mass Detection Using the First Torsional Mode of Microcantilevers", Proc. of ICMA'07 : IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, Chine. Session invitée., August 2007
- [Yig02] A.S. Yigit, A.G. Ulsoy, A. Allahverdi, "Optimizing Modular Production in a Reconfigurable Manufacturing System", Journal of Intelligent Manufacturing, August, 2002
- [You89] Yourdon, "Modern Structured Analysis and Systems Specification", Englewood Cliffs, New Jersey: Yourdon Press, 1989

## Curriculum Vitæ

### **Éric DESCOURVIÈRES**

né le 7 juillet 1973

de nationalité française

✉ eric.descourvieres@univ-fcomte.fr

### **Formation**

- 2003-2010    Thèse de Doctorat  
                 Institut femto-st<sup>11</sup>, département Automatiques et Systèmes Micro-Mécatroniques
- 1996-1997    DEA SYAM<sup>12</sup> option « Robotique & Systèmes Automatiques » au LIRMM<sup>13</sup>  
                 4<sup>ème</sup> année à l'ENS Cachan - classement : 3 / 11 -  
                 « Conception et réalisation d'un prototype de robot bipède pour l'expérimentation de commandes »
- 1995-1996    Agrégation externe de Mécanique B1 - 25<sup>ème</sup> lauréat au classement national -  
                 3<sup>ème</sup> année à l'ENS Cachan
- 1995            Admis au concours d'entrée à l'ENS Cachan - 6<sup>ème</sup> lauréat au classement national -
- 1993-1995    Titre d'Ingénieur-Maître « Génie Mécanique » option « Conception Mécanique »  
                 I.U.P. Ingénierie et Qualité, UFC, UFR-st, Besançon - classement : 2 / 21 -  
                 Maîtrise de mécanique - mention « Assez Bien », classement : 3 / 21 -  
                 Licence de mécanique - mention « Assez Bien », classement : 1 / 67 -
- 1991-1993    Classes préparatoires technologiques  
                 Lycée technique Gustave Eiffel, Dijon
- 1991            Baccalauréat E - mention « Assez Bien » -  
                 Lycée technique Jules Haag, Besançon

### **Expériences professionnelles**

- Depuis nov. 2009    Professeur Agrégé à l'Université de Franche-Comté  
                 Département Mécanique-Génie Mécanique de l'UFR-st
- 2008- 2009    Professeur en CPGE TSI1  
                 Lycée G.T. Jules Viette de Montbéliard

<sup>11</sup> femto-st : Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies,

<sup>12</sup> SYAM : SYstèmes Automatiques et Microélectronique

<sup>13</sup> LIRMM : Laboratoire d'Informatique, Robotique et Microélectronique de Montpellier

- 2007- 2008    Professeur en BTS CIM et STI-GE1  
Lycée Edgar Faure de Morteau
- 1998- 2007    Professeur Agrégé au cycle préparatoire intégré et cycle d'ingénieurs Mécatronique  
Département Mécanique de l'INSA Strasbourg
- 1997-1998    Scientifique du contingent à l'ENSIETA<sup>14</sup> de Brest - Service National -
- 1996-1997    Vacataire à la Faculté des Sciences II & I.U.P. Génie Mécanique de Montpellier
- Depuis 1999   Jury pour les Concours des CPGE E4A-E3A - banque ENSAM, ENS de Cachan -  
Epreuve de Sciences Industrielles et Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés en PSI, PT, TSI

## Publications

Hériban D., Descourvières E., Ballarin B., Gendreau D., Lutz P., "Architecture modulaire pour le pilotage des microsystèmes de production. Application à la micromanipulation télé-opérée", 5e Conférence internationale sur l' « automatisation industrielle », ETS, Montréal, Québec, Canada, 11-13 juin 2007

Descourvières E., Debricon S., Gendreau D., Lutz P., Philippe L., Bouquet F., "Towards Automatic control for microfactories ", 5e Conférence internationale sur l' « automatisation industrielle », ETS, Montréal, Québec, Canada, 11-13 juin 2007

Kiefer Renaud, Descourvières Eric, "Advancement of the pedagogic mini-UAV project « Drone Cigogne » ", 3rd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicle Systems - MAV07 - & European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition - EMAV2007 -, 17-21 September 2007, Toulouse, France

Descourvières E., Gendreau D., Lutz P. « Data representation for the control of full-automated microfactories », Proc. (CD ROM) of the 5th International Workshop on Microfactories, IWMF'06, 25-27 October 2006, Besançon, France

Descourvières E., Gendreau D., Lutz P., Kiefer F., " Specifications of technical information system dedicated to a reorganizable and reconfigurable microfactory", Proc. (CD ROM) of the 4th International Workshop on Microfactories, IWMF'04, 15-17 October 2004, Shanghai, Chine

Descourvières Eric, "Formation des ingénieurs mécatroniciens, l'expérience de l'INSA Strasbourg (ex ENSAIS) ; Training of mechatronic engineers, the experience of INSA

---

<sup>14</sup> ENSIETA : Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs des Etudes et Techniques d'Armements

Strasbourg (formerly ENSAIS) ", Elsevier Mécanique & Industries, Volume 4, Issue 5, Pages 569-574, September-October 2003, Réflexion sur la Mécatronique, Rennes, France.

## Sessions poster

Eric Descourvières, Dominique Gendreau, Philippe Lutz « Modélisation UML des données d'une micro-usine en vue de son pilotage automatisé », Laboratoire Européen Associé microtechniques, Arc et Senans, 2006

Eric Descourvières, Dominique Gendreau, François Kiefer\*, Philippe Lutz, « Vers une nouvelle approche dans la modélisation du système d'information d'une micro-usine », 6e Congrès international de génie industriel, 7-10 juin 2005, Besançon

LAB "Micro-systems of production" team, « EMISMAP\* Project : data aspect, \* Experimentation of Assembly and Production Modular Micro-Systems », Laboratoire Européen Associé microtechniques, Arc et Senans, 2005

Eric Descourvières, Dominique Gendreau, François Kiefer\*, Philippe Lutz, « Conception d'un système d'information pour les microsystèmes de production », Laboratoire Européen Associé microtechniques, Arc et Senans, 2004

Participation à la table ronde « Peut-on enseigner réellement la mécatronique ? », Premières rencontres européennes industrie - recherche – formations en mécatronique : Enjeux et perspectives de la mécatronique, 20 & 21 mars 2003, Annecy

## Distinctions

Chef de projet de l'équipe « cigogne » au concours universitaire « drones miniatures » DGA-ONERA

2003 Qualification de l'équipe pour l'obtention du **budget de 40 000 €**

2005 **Vainqueur ex-aequo** sur 17 équipes nationales et internationales

Prime de 8 000 € avec la « mention scénario »

- stratégie et structure volante innovantes -

Résultat : Survol de l'aire de jeu pendant 10 min et repérage des principales cibles

2006 Présentation au « **salon international de drones : EURO-UAV** »

Qualification de l'équipe d'étudiant au « Prix des Ingénieurs de l'Année 2006 »

2007 **Médaille d'Argent de la Société d'Encouragement au Progrès**

Palais du Luxembourg à Paris - Sénat -

## Résumé

Les travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre de la conception des systèmes de production/assemblage pour les produits de taille micrométrique, appelés micro-produits. Il s'agit de produits constitués de composants de taille submillimétrique, si bien qu'il est difficile, voire impossible, de les observer à l'œil nu et encore de les manipuler précisément soit directement avec les doigts, soit avec un outillage manuel.

FEMTO-ST, dans son équipe SAMMI - Systèmes Automatisés de Micromanipulation et de Micro assemblage - propose des solutions robotisées pour la manipulation et l'assemblage de ces microproduits. Ces microrobots sont conçus et réalisés pour tenir compte des forces en présence à cette échelle et les exploiter au mieux pour une manipulation dextre et précise. L'intégration de ces microrobots pour concevoir des systèmes de production - nous traitons ici le problème du micro-assemblage - a fait émerger le concept de micro-usine. Au niveau international, nous avons pris un positionnement original en proposant une modularité non seulement au niveau des cellules de production mais également à l'intérieur de ces cellules. Cette modularité porte à la fois sur les structures physiques mais également sur les systèmes de commande et de supervision.

Dans ce manuscrit, nous proposons d'étudier la pertinence de cette décomposition modulaire en fonction des conditions de production. Notamment, nous nous placerons dans le contexte de production changeante nécessitant réorganisation et/ou reconfiguration du système de production.

Trois parties composent le travail de thèse. Nous avons établi une structure de micro-usine et une stratégie de commande dont nous avons identifié les propriétés. Nous avons ensuite formalisé une architecture des données. Enfin, l'étude du comportement a été obtenue par simulation d'un modèle réalisé par réseau de Petri stochastique et T-temporisé. L'évolution stochastique se justifie par l'incertitude inhérente au micromonde, celle-ci est d'autant moins importante que s'accroît la connaissance et le savoir-faire dans une situation donnée. La temporisation permet de prendre en considération les durées relatives des reconfigurations ou réorganisations qui évoluent au gré des expérimentations.

Dans le cadre d'une conception orientée objet, les modélisations sont établies au moyen du langage de modélisation graphique UML qui autorise une analyse syntaxique.

Concernant les études menées avec le modèle mathématique discret de réseau de Pétri, l'outil de simulation utilisé est PACE - IBE Simulation Engineering GmbH -. Ce logiciel permet une programmation conditionnant les transitions grâce au langage de programmation orienté objet, SMALLTALK, pour temporiser et rendre stochastique l'exécution du modèle. PACE comporte par ailleurs une interface graphique utilisateur souple et lisible. Les résultats de simulation sont ensuite analysés et mis en forme avec MATLAB.

Ces résultats nous ont montré la pertinence de l'approche modulaire et du choix de décomposition mis en place pour assurer de bonnes performances à une cellule de micro-assemblage.

**Mots clés : Micro système de production, micro-usine, reconfigurable, réorganisable, système d'information, modélisation de la connaissance, UML, réseau de Petri stochastique.**

## Abstract

The works of this thesis register as part of the designing of the systems of production / assembly for micrometric size products, called micro-products. It is about products made of components of sub-millimetric size. It is therefore difficult or even impossible, on one hand, to notice them in the bare eye and, on the other hand, to manipulate them precisely either directly with fingers, or with a manual tool.

FEMTO-ST, in its team SAMMI - Automated systems of micro handling and micro assembly - offers robotized solutions for handling and assembling these micro-products. These micro-robots are designed and built to take into account forces that are present at this scale and to use these forces at best for a precise handling. The integration of these micro-robots to establish production systems - we treat here the problem of micro-assembly - brought up the concept of micro-plant. We took an original view at an international level by offering a modularity at the level of the cells of production but also inside these cells. This modularity brings as well physical structures as order, control and supervision systems.

We offer in this thesis to study the pertinence of this modular breakdown according to the production situations. We will specifically consider a situation where the changeable production requires reorganisation and / or reconfiguration of the system of production.

This thesis is made of three sections. We established a structure of micro-factory and a command strategy for which we identified the priorities. We then formalized architecture of data. Finally, the behavioural study was obtained through simulation of a model accomplished by stochastic and T-timed Petri Net. Aleatory evolution clears itself by uncertainty inherent in the micro-world. This uncertainty becomes less important with the development of knowledge and expertise in a given situation. Time delay allows taking into consideration the duration of the reconfigurations or of the reorganizations that evolve during the experimentations.

As part of an object-oriented design, modeling is established thanks to the language of UML graphic modeling, which allows a syntactic analysis.

Regarding studies led with the discreet mathematical model of Petri Net, the simulation tool which is used is PACE - IBE Simulation Engineering GmbH -. This software allows a programming that conditions the transitions thanks to object-oriented programming language, SMALLTALK, to time delay and make the execution of the model aleatory. PACE includes also a graphic interface, which is user friendly. The simulation results are then analysed and shaped with MATLAB.

These results showed us the pertinence of modular approach and choice of decomposition made to guaranty good performances for a cell of micro-assembly.

**Key words : Micro-system of production, micro-factory, system of information, modeling of knowledge, UML, stochastic Petri Net.**